

Implementace průmyslového mobilního robotu do SmartFactory

Implementation of an Industrial Mobile Robot in SmartFactory

Jan Zemánek

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Koziolek, Ph.D.

Ostrava, 2021

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o technologii autonomních mobilních robotů. Konkrétně se práce zabývá implementací autonomního mobilního robota do Smartfactory, CPIT TL3. V teoretické části práce je uvedena historie, princip funkčnosti, typy mobilních robotů a jejich využití. Experimentální část práce se věnuje návrhem a následnou implementací autonomního mobilního robota. Úkolem mobilního robota je obsluha výrobní linky, přebírání vyrobených produktů a následné doručení produktů. Práce popisuje jednotlivé kroky, které byly nutné pro zprovoznění mobilního robota, jako je načtení virtuální mapy prostoru a vytvoření sítě pro komunikaci s mobilním robotem. Hlavní část experimentální části se zabývá testováním přesnosti najíždění mobilního robota na jednotlivé pozice a tvorbou komunikace mezi výrobní linkou a mobilním robotem. Závěr práce se věnuje možnostem kooperace dvou mobilních robotů. Výsledkem práce je autonomní mobilní robot, který je schopen automatické obsluhy výrobní linky.

Klíčová slova

MiR, autonomní mobilní robot, mobilní průmyslový robot, automaticky řízené vozidlo, obsluha výrobní linky

Abstract

This bachelor thesis is about autonomous mobile robots. Specifically, the thesis deals with the implementation of an autonomous mobile robot in Smartfactory, CPIT TL3. The theoretical part of the thesis presents the history, the principle of functionality, types of mobile robots and their use. The experimental part of the work is devoted to the design and subsequent implementation of an autonomous mobile robot. The task of the mobile robot is to operate the production line, take over the manufactured products and then deliver the products. The thesis describes the individual steps that were necessary for the commissioning of a mobile robot, such as creation a virtual map of space and creating a network for communication with a mobile robot. The main part of the experimental part deals with testing the accuracy of moving the mobile robot to individual positions and creating communication between the production line and the mobile robot. The end of thesis deals with the possibility of cooperation of two mobile robots. The result of the bachelor thesis is an autonomous mobile robot that is capable of automatically operating the production line.

Keywords

MiR, autonomous mobile robot, mobile industrial robot, automated guided vehicle, production line operator

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jiřímu Koziorkovi, Ph.D. za odborné vedení a konzultace této práce. Děkuji také Ing. Radimovi Hercíkovi, Ph.D. za pomoc a cenné rady při realizaci práce.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	7
SEZNAM ILUSTRACÍ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD.....	10
1 ÚVOD DO MOBILNÍCH ROBOTŮ	11
1.1 Typy mobilních robotů	12
1.2 Použití mobilních robotů	14
1.3 Výrobci mobilních robotů.....	15
1.3.1 MiR (Mobile Industrial Robots)	15
1.3.2 KUKA.....	16
1.3.3 Amazon robotics (Kiva Systems).....	17
2 ANALÝZA VYUŽITÍ MOBILNÍCH ROBOTŮ VE SMARTFACTORY	19
2.1 Produkty výrobní linky.....	21
2.1.1 Design produkt	21
2.1.2 LEGO produkt	21
2.2 Využití průmyslového mobilního robota.....	21
2.3 Mobilní roboty MiR	22
2.4 Autonomní mobilní robot MiR100	23
2.4.1 Ovládání / programování robota.....	24
2.4.2 Systém navigace	24
2.4.3 Detekce překážek	25
2.4.4 Rychlost pohybu	27
2.4.5 Barevná signalizace	28
2.4.6 Bezpečnost	28
2.4.7 Nabíjení	28
3 NÁVRH IMPLEMENTACE MOBILNÍCH ROBOTŮ DO SMARTFACTORY	30
3.1 Doručení design produktu k zákazníkovi.....	30
3.2 Prezentace LEGO produktu	31
4 REALIZACE NAVRŽENÉ ÚLOHY	32
4.1 Virtuální mapa prostoru	32
4.1.1 Vytvoření virtuální mapy SmartFactory	32
4.1.2 Komponenty virtuální mapy.....	33
4.2 Začlenění mobilních robotů do sítě SmartFactory	34
4.3 Komunikace se SmartFactory	35
4.4 Tvorba programu.....	37
4.4.1 Hlavní mise	37
4.4.2 Mise čekání na produkt.....	38

4.4.3	Mise doručení LEGO produktu	39
4.4.4	Mise doručení design produktu	39
4.4.5	Mise nabíjení	40
4.5	Možnosti přesného najetí do linky	40
4.5.1	Kamera	41
4.5.2	Senzory vzdálenosti	41
4.5.3	Markery	41
4.6	Testování najíždění do linky	41
4.6.1	Pozice bez markeru	42
4.6.2	VL marker	43
4.6.3	L marker.....	44
4.6.4	Další typy markerů.....	45
4.7	Použití vybraného způsobu navigace	46
5	OVĚŘENÍ MOŽNOSTÍ KOOPERACE DVOU MOBILNÍCH ROBOTŮ	47
	ZÁVĚR	48
	LITERATURA	49
	SEZNAM PŘÍLOH.....	51

Seznam použitých symbolů a zkratek

AGV	–	Automated guided vehicle
AMR	–	Autonomous mobile robot
API	–	Application Programming Interface
AUX	–	Auxiliary cable
DHCP	–	Dynamic Host Configuration Protocol
DI	–	Digital input
DQ	–	Digital output
EKG	–	Electrocardiography
I/O	–	Input/output
IP	–	Internet Protocol
LAN	–	Local Area Network
MIR	–	Mobile industrial robot
MM	–	Mobile manipulator
PLC	–	Programmable Logic Controller
REST	–	Representational state transfer
SDS	–	Scientific Data Systems

Seznam ilustrací

Obrázek 1: První mobilní robot Shakey [4].....	11
Obrázek 2: Typy mobilních robotů od firmy MiR [10].....	15
Obrázek 3: Příslušenství MiR [11][12][13].....	15
Obrázek 4: Mobilní robot KUKA KMR iiwa [16].....	16
Obrázek 5: Mobilní robot KUKA KMR QUANTEC [17]	17
Obrázek 6: Mobilní robot DU1000[19].....	17
Obrázek 7: Mobilní robot Amazon robotics – Pegasus [19].....	18
Obrázek 8: 3D model výrobní linky	19
Obrázek 9: Paletky pro přepravu komponentů.....	20
Obrázek 10: Vizualizace pro zadání výroby produktu	20
Obrázek 11: Design produkt.....	21
Obrázek 12: LEGO produkt.....	21
Obrázek 13: Prostor pro předávání výrobku na mobilního robota	22
Obrázek 14: mobilní robot MiR100	23
Obrázek 15: Princip navigace mobilního robota [20].....	24
Obrázek 16: Naplánovaná globální trasa mobilního robota [20]	25
Obrázek 17: Zorný úhel laserových senzorů [20]	26
Obrázek 18: Zorný úhel 3D kamer [20]	27
Obrázek 19: Ultrazvukové senzory.....	27
Obrázek 20: Rychlostní zóny robota [20]	28
Obrázek 21: Nabíjecí stanice MiR Charge 24V	29
Obrázek 22: MiR100 – napájecí konektory pro MiR Charge 24V	29
Obrázek 23: Trasa doručení design produktu	30
Obrázek 24: Trasa prezentace LEGO výrobku	31
Obrázek 25: Virtuální mapa Smartfactory.....	32
Obrázek 26: Symbol pozice ve virtuální mapě	33
Obrázek 27: Symbol VL Markeru a jeho vstupní pozice	34
Obrázek 28: Schéma zapojení digitálních vstupů WISE modulu	36
Obrázek 29: Schéma zapojení digitálního výstupu DO0 WISE modulu	36
Obrázek 30: Diagram funkčnosti hlavní mise.....	38
Obrázek 31: Diagram funkčnosti mise čekání na produkt.....	39
Obrázek 32: Diagram funkčnosti mise doručení LEGO produktu.....	39
Obrázek 33: Diagram funkčnosti mise doručení design produktu	40
Obrázek 34: Diagram funkčnosti mise dobíjení	40
Obrázek 35: Test přesnosti mobilního robota – bez markeru.....	42
Obrázek 36: Test přesnosti mobilního robota – VL marker	43
Obrázek 37: Test přesnosti mobilního robota – L marker.....	44
Obrázek 38: Umístění finálního L markeru do prostoru linky	46

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání člověka a mobilního robota [3]	13
Tabulka 2: Specifikace mobilních robotů MiR100 a MiR250 [20][21]	23
Tabulka 3: Rychlostní zóny robota	27
Tabulka 4: barevná signalizace stavu mobilního robota [20]	28
Tabulka 5: Pozice 1. implementace	31
Tabulka 6: Pozice 2. implementace	31
Tabulka 7: Rozdělení IP adres pro bezdrátovou síť MiR	35
Tabulka 8: Popis signálů komunikace (z pohledu WISE modulu)	35
Tabulka 9: Výsledky testování přesnosti – bez markeru	42
Tabulka 10: Výsledky testování přesnosti – VL marker	44
Tabulka 11: Výsledky testování přesnosti – L marker	45

Úvod

Bakalářská práce se zabývá problematikou autonomních průmyslových mobilních robotů. Jedná se stále o poměrně novou technologii, která postupně nachází své využití v průmyslu, ale také v jiných odvětvích. Mezi největší výhody autonomních robotů patří jejich samostatnost a schopnost orientovat se v prostoru, bez nutnosti externích vodících čar, či jiných prvků v prostředí. Autonomní mobilní roboty se orientují za pomoci pokročilých senzorů a virtuální mapy prostoru. Své využití najdou v oblasti skladování, přepravy, ale také výroby.

V průběhu práce se věnuji autonomním mobilním robotům od společnosti Mobile industrial robots (MiR). Konkrétně pracuji s modely MiR100 a MiR250. Oba modely jsou vybaveny kombinací laserových senzorů, ultrazvukových senzorů a kamer. Společně umožňují robotům bezpečný pohyb po prostředí a možnost reagovat na většinu typů překážek. Schopnosti rozpoznání překážek se budu věnovat při vytváření virtuální mapy Smartfactory, kde otestuji například schopnost rozpoznání skleněných dveří.

Dle zadání se v práci zabývám implementací průmyslového mobilního robotu do prostorů Smartfactory, CPIT TL3. V nově vzniklých prostorech Smartfactory je umístěna automatická výrobní linka, která slouží k prezentaci technologií průmyslu 4.0. V práci se věnuji návrhu vhodné implementace mobilního robota do systému výrobní linky. Cílem práce je naprogramovat mobilního robota tak, aby automaticky přebíral hotové produkty výrobní linky a distribuoval je po prostoru Smartfactory. Hlavní body, kterými se je nutné v rámci implementace zabývat je nastavení bezdrátové sítě pro mobilního robota, načtení virtuální mapy prostorů Smartfactory, komunikace mezi výrobní linkou a mobilním robotem, přesnost najíždění mobilního robota na jednotlivé pozice a vytvoření programu pro robota.

V první kapitole práce se věnuji teoretickému úvodu, který obsahuje základní informace o historii a principu funkčnosti autonomních mobilních robotů. Dále obsahuje informace, jaké typy mobilních robotů se používají, včetně zdůraznění rozdílů mezi AMR a AGV. Obsahuje také v jakých odvětvích se mobilní roboty využívají a příklady firem, které se zabývají výrobou mobilních robotů.

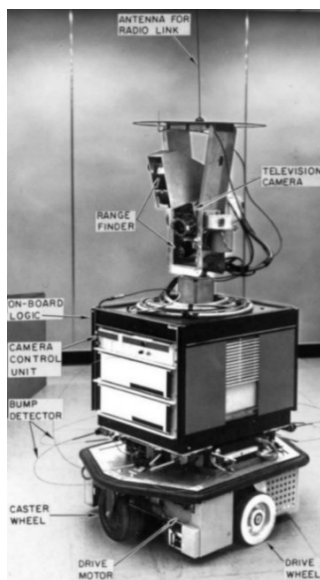
V následujících dvou kapitolách se zabývám analýzou funkcí Smartfactory a následným návrhem vhodných implementací autonomních mobilních robotů. V rámci analýzy funkcí Smartfactory jsem se zaměřil na automatickou výrobní linku, která je ve Smartfactory umístěna. Linka vyrábí dvojici produktů a každý z nich má jinou cílovou lokaci, a z tohoto důvodu jsem navrhnul dvojici implementací mobilního robota. Pro obsluhu výrobní linky je použit mobilní robot MiR100. Dále je v kapitolách uveden popis mobilního robota MiR100 a princip jeho funkčnosti (navigace, nalezení trasy, nabíjení a další).

V posledních dvou kapitolách se zabývám samotnou realizací navržené úlohy, kterou je obsluha výrobní linky za pomoci mobilního robota. V kapitole je uvedeno, jak jsem postupoval při uvedení mobilního robota do provozu. Dále se práce zabývá komunikací mezi výrobní linkou a mobilním robotem, přesností mobilního robota a kooperací dvou mobilních robotů.

1 Úvod do mobilních robotů

V této práci se budu zabývat autonomními mobilními roboty (zkráceně AMR). Jedná se o mobilní roboty, které se dokážou autonomně a plně samostatně pohybovat v prostředí. Pro pohyb v prostředí využívají senzory, které umožňují rozpoznání překážek různých druhů. Podměty z těchto senzorů zpracovává software mobilního robota, který rozhoduje o dalších krocích. Autonomní mobilní roboty dokážou určit co možná nejvíce efektivní cestu k cíli a v případě, že narazí na překážku, ji dokážou objet. To dává AMR velkou flexibilitu a účinnost v plnění úkolů. [1][2]

Historie mobilních robotů začíná u nepohyblivých, statických průmyslových robotů. První průmyslové robotické rameno UNIMATE bylo použito roku 1961 ve firmě General Motors. Rameno bylo instalováno na linku pro výrobu automobilů, kde obstarávalo svařování dílů. Nástupcem tohoto poměrně jednoduchého průmyslového robota se roku 1969 stala The Stanford Arm. Jednalo se o první plně elektricky napájené robotické rameno, které bylo řízené počítačem. Tyto prvotní robotická ramena byla po instalaci na výrobní linku schopná provádět opakované činnosti jako svařování, lakování, řezání, nebo překládání dílů. Postupem času se začal vytvářet koncept pohyblivého průmyslového robota. První pokusy o vytvoření mobilního robota, který je schopen volného pohybu v prostředí, začaly už roku 1948. Tohoto roku byly postaveny roboty Elma a Elsie. Roboty dokázaly pomocí světelného senzoru detekovat intenzitu světla, a podle toho se vyhýbat překážkám. Roku 1970 byl postaven další prototyp robota Stanford Cart. Jednalo se o robota vybaveného kamerou, díky které byl robot schopen sledovat bílou čáru a pohybovat se po ní. Tento robot byl v průběhu dalších let vylepšován o nové technologie. Roku 1979 byl robot vybaven pokročilou kamerou a dokázal bez lidské asistence projet místnost, ve které byly rozmístěny překážky v podobě židlí. V roce 1970 byl také představen robot Shakey, první mobilní robot řízený umělou inteligencí, který byl schopen vlastního rozhodování. [3][5]



Obrázek 1: První mobilní robot Shakey [4]

Robot Shakey se skládá z několika částí. Základem robota je platforma, která zajišťuje jeho pohyb. Je vybavena koly, motory, akumulátorem a senzory nárazu. Na platformě je umístěna kontrolní jednotka, která zpracovává informace ze senzorů a provádí požadované instrukce. O odesílání dat do výpočetního počítače se stará anténa, umístěná na vrcholu robota. Robot je také vybaven TV kamerou

a senzorem vzdálenosti. Úkolem robota bylo autonomně projet místnost plnou překážek. Informace o prostředí, v kterém se robot pohybuje, dostával ze senzorů nárazu, senzoru vzdálenosti a kamery, která pravidelně fotografovala prostředí před robotem. Informace ze senzorů a kamery se přes anténu posílaly ke zpracování na sálový počítač SDS 940. Po zpracování informací se do robota vrátili instrukce, jak a kde se má pohybovat. Zajímavé je však porovnání s dnešními mobilními roboty. I přes to, že se jedná o jednoho z prvních mobilních robotů, jeho konstrukce a vybavení jsou téměř shodné s dnešními mobilními roboty. Místo tehdejšího drátu pro detekci nárazu používáme laserové senzory, pro měření vzdálenosti používáme ultrazvukové senzory a optická kontrola pomocí kamery zůstala zachována. Podstatný rozdíl je, že díky zmenšování komponentů obsahuje dnešní mobilní robot všechny komponenty, včetně výpočetního výkonu, přímo v pojízdné platformě. [4]

V následujících letech se vývoj mobilních robotů posouval zároveň s dostupnými technologiemi. Jednalo se především o pokroky v umělé inteligenci, výpočetního výkonu a senzorů. Mobilní roboty našly uplatnění například na průzkumné účely, ale nebyli dosti vyspělí, aby dokázali zastoupit člověka v průmyslu. Místo mobilních robotů se v průmyslu začali používat automaticky naváděná vozidla (viz. 1.1), které se pohybují podle navigačních prvků (drát, magnetická páska) v prostředí. Zlom nastal až v roce 2010, kdy byly představeny první plně autonomní mobilní roboty. Do dnes jsou autonomní mobilní roboty poměrně novou technologií, která není masivně používána. [5]

1.1 Typy mobilních robotů

Mobilní roboty lze rozdělit na velké množství typů, ať už podle konstrukce, použití, vybavení, typu pohonu, nebo podle jiného prvku robota. Z hlediska použití mají mobilní roboty uplatnění ve velkém množství odvětví jako je průmysl, zdravotnictví, výzkum, logistika, či další. Pro účely této práce bych rozdělil mobilní roboty dle způsobu navigace (řízení) a popsal hlavní rozdíly mezi těmito typy. Prvním typem jsou roboty, které se navigují za pomoci předem daných vodících linií. Tyto roboty se označují jako automaticky řízené vozidlo. V současné době je tento typ používán v průmyslu, a to především na přepravu materiálu, či výrobků. Druhým typem jsou autonomní mobilní roboty. Ty se dokážou navigovat bez pomoci jakýchkoliv pomocných prvků a pro orientaci využívají pouze své senzory. Autonomní mobilní robot je tedy schopen provádět vlastní rozhodnutí, kterou trasu si zvolí a automaticky plnit zadané úkoly. Tyto autonomní mobilní roboty jsou využívány například v průmyslu, či logistice. Do této kategorie spadají také robotické vysavače, které již nejsou označovány jako průmyslové a nacházejí se především v domácnostech. [3]

V následující části jsou podrobněji popsány rozdíly mezi **AGV** (automated guided vehicle, česky, automaticky řízené vozidlo) a **AMR** (autonomous mobile robot, česky, autonomní mobilní robot).

Automaticky řízené vozidlo (AGV) by se dalo označit jako předchůdce AMR. Hlavní rozdíl spočívá v systému navigace. AGV obsahuje minimum řídicích systémů a dokáže vykonávat pouze základní instrukce. Řízení a rozdávání instrukcí je řešeno za pomoci externího systému, který se většinou stará o velký počet AGV. AGV se pohybují pouze po předem daných a neměnných trasách. Pro vyznačení tras se využívají vodiče, magnetické pásy, odrazové značky, lasery nebo jiné navigační prvky v prostředí. To vyžaduje zakomponovat tyto prvky do prostředí, ve kterém se AGV bude pohybovat. Při nutnosti upravit trasy nebo změnit prostředí, je nutné upravit také vodící prvky pro AGV. Podstatné je chování AGV při zablokování trasy, po které se má pohybovat. Vozidlo sice obsahuje senzory, aby překážku detekovalo a zastavilo, neobsahuje již ale logiku, díky které by dokázalo

překážku autonomně objet. V takové situaci je nuceno před překážkou zastavit a počkat na její odklizení. [6][7]

Autonomní mobilní robot (AMR) pro svůj pohyb nepotřebuje v okolním prostředí žádné navigační prvky. Místo těchto navigačních prvků využívá vlastní virtuální mapu prostorů v kombinaci s pokročilou senzorickou sadou. Díky virtuální mapě ví, kde se nacházejí pevné překážky jako zdi, police, stroje a další. Při obdržení požadavku o přesun na jiné místo si pomocí této mapy autonomně vygeneruje nejlepší možnou cestu, kterou se na místo dostane. Pokud se v prostředí něco změní, stačí upravit onu virtuální mapu prostředí a okamžitě se bude robot novým překážkám vyhýbat. AMR obsahuje většinou kombinaci laserového senzoru, ultrazvukového senzoru a kamery. Tato kombinace zajišťuje rozpoznání překážek většiny typů. Například sklo by laserový senzor nerozpoznal jako překážku (laserový paprsek projde skrz), proto je vhodné použití v kombinaci s ultrazvukovým senzorem, který již sklo jako překážku rozezná. Údaje ze senzorů se využívají pro další monitorování okolí, aby robot dokázal reagovat i na pohyblivé překážky, nebo překážky, které nejsou zaznamenány v jeho virtuální mapě. Pokud na takovou překážku narazí, zastaví se a vygeneruje si náhradní trasu k cíli. Díky tomu dosahuje AMR mnohem větší flexibility nežli AGV. [6][7]

Nelze ale přesně určit, kde je lepší použít AGV a kde AMR. Z cenového hlediska je jeden autonomní mobilní robot násobně dražší nežli jedno automaticky řízené vozidlo. Autonomní mobilní roboty je vhodné použít při celkovém počtu jednotek kusů robotů. Každý AMR je sice dražší na pořízení, nabízí však rychlou implementaci do prostředí, a především nepožaduje žádnou úpravu prostoru, po kterém so bude pohybovat. V případě, že je nutno desítek, či stovek robotů, je vhodné použití automaticky řízených vozidel. To vyplývá z cenových nároků na jeden kus robota, kdy se již vyplatí upravit prostředí pro jejich pohyb. Nasazení AGV je však časově náročnější a případné úpravy tras složitější. Velký počet robotů vyžaduje také sofistikovaný řídicí systém, který umožňuje dobrou vzájemnou kooperaci robotů. V dnešní době existují také AGV, které jsou dovybaveny senzory a logikou, díky které dokáže objet překážku. Těmito kroky rozdíly mezi jednotlivými typy téměř mizí. Zda se tedy vyplatí použití AMR nebo AGV záleží na konkrétním použití. I když může AMR vypadat jako pokročilejší verze AGV, ne vždy je pro aplikaci vhodný a záleží na konkrétním případě využití.[6][7]

Základní částí autonomního mobilního robota je často univerzální platforma, která obsahuje veškeré vybavení pro navigaci a pohyb robota v prostředí. Platforma je vybavena senzory pro rozpoznání překážek v okolí, elektromotory pro pohyb, akumulátorem pro napájení a počítačem, či kontrolní jednotkou řídící celého mobilního robota. Vybavení robota se dá přirovnat k člověku, pomocí následující tabulky.

Tabulka 1: Porovnání člověka a mobilního robota [3]

Funkce	Člověk	Autonomní mobilní robot
Intelligence, rozhodování	Mozek	Počítač, umělá inteligence
Pohyb / manipulace	Končetiny (nohy, ruce)	Kola, pásy, nohy
Ovládání pohybu	Svaly	Hydraulika, elektrická energie
Vnímání	Oči, uši, hmat	Senzory (optický, ultrazvukový, laserový...), kamera
Komunikace	Řeč, gesta	Data, zvuk, video
Dodání energie	Jídlo	Zdroj energie (akumulátor...)

Velkou výhodou je integrovat veškeré prvky do platformy mobilního robota. To přináší možnost rozšířit platformu o další nástroje či nadstavby. Výrobce může vyrábět jeden typ platformy a tu dovybavit dalšími nástroji pro konkrétní použití robota. Takový způsob výroby zvolila firma MiR (viz. 1.3.1). Mobilní roboty jsou často využívány pro přepravu. Za tímto účelem je možné robota vybavit nadstavbou pro zdvih palet, polic, nebo beden. Pro manipulaci s objekty lze mobilního robota vybavit nadstavbou s robotickým ramenem. Takový robot je označován jako **mobilní manipulátor** (MM – mobile manipulator). Jedná se o velice mobilní, flexibilní roboty s širokým uplatněním. Mobilní manipulátor kombinuje výhody flexibility mobilního robota a funkce průmyslového robota. Konstrukčně se skládá z mobilní platformy a robotického ramena. Platforma zajišťuje autonomní pohyb manipulátoru v prostoru a jejím účelem je zavést robotické rameno na požadované místo, či pozici. Robotické rameno je určeno pro samotnou práci, kterou bude manipulátor vykonávat. Takový robot může být použit například pro zásobování pracovišť materiálem. Tento úkol je autonomně schopen provádět například robot KUKA KMR iiwa (více v 1.3.2). [3][8]

1.2 Použití mobilních robotů

Využití autonomních mobilních robotů v průmyslu přináší hned několik výhod. Autonomní mobilní roboty dosahují velké míry flexibility, možnosti rychlého nasazení, možnost jednoduchého rozšíření počtu robotů či automatizace doposud nemožných procesů. Využití závisí vždy na prostředcích, kterými je robot vybaven. Nejčastěji se jedná o následující využití.

V oblasti přepravy:

- Manipulace, doprava, nakládání / vykládání
- Skladování, třídění
- Balení
- Další – čištění, kontrola

V oblasti výroby:

- Osazování součástek, spojování dílů
- Svařování, broušení, lepení, lisování, lakování
- Manipulace, přeprava
- Inspekce, kontrola kvality, čištění

Pro každé konkrétní použití je robot vybaven jiným vybavením, aby byl pro danou práci vhodný. Právě mobilita robota je klíčová například pro opracování velkých dílů. Výhod mobilních robotů vůči lidskému pracovníkovi je hned několik. Mobilní roboti dokážou pracovat v nepřetržitém provozu, dosahují vyšší kvality práce, nebo větší rychlosti. Lze je také použít pro práce v nevhodném, či nebezpečném prostředí, kde by byl člověk vystaven zdravotnímu riziku.

1.3 Výrobci mobilních robotů

1.3.1 MiR (Mobile Industrial Robots)

Jak už název firmy napovídá, firma Mobile Industrial Robots (zkráceně MiR) se zabývá výhradně výrobou mobilních robotů. Aktuálně mají v nabídce pětici mobilních robotů. Jednotlivé modely nesou označení podle hmotnosti, kterou dokážou přepravovat. Nejmenší model MiR100 je určen pro přepravu nákladu o maximální hmotnosti 100 kg. Naopak největší model MiR1000 je schopen převézt až 1000 kg a je určen převážně na přesun palet.



Obrázek 2: Typy mobilních robotů od firmy MiR [10]

Roboty MiR spadají do kategorie autonomních mobilních robotů. Dokážou si autonomně najít cestu k cíli a nevyžadují přídatné vodící prvky, tak jako AGV. Pro orientaci používají předem vytvořenou virtuální mapu prostorů. Díky senzorickému vybavení se roboty MiR dokážou orientovat i ve složitém prostředí a automaticky najdou nejefektivnější cestu k cíli. Při pohybu je robot bezpečný a reaguje i na dynamicky měnící se prostředí. Pokud robot detekuje na cestě do cíle překážku, najde jinou trasu a překážku objede. Při vstupu člověka před robota se automaticky zastaví a opět najde alternativní cestu, aby se vyhnul kolizi. [10]

Mobilní roboty MiR jsou využívány v automobilovém odvětví, logistice, výzkumu, nebo ve skladech. Roboty jsou používány především pro přepravu palet, polic, vozíků či jiného materiálu. Pro přepravu daného typu nákladu jsou roboty vybaveny vhodnou nadstavbou. Na následujících obrázcích lze vidět oficiální MiR příslušenství pro přepravu (Obrázek 3). Mezi další oficiální nadstavby patří několik typů robotických ramen, dopravníkový pás, ale také dezinfekční zařízení. Nadstavba určená pro dezinfekci dokáže dezinfikovat prostředí díky UV záření a také obsahuje kameru pro kontrolu tělesné teploty. Další nadstavby pro jiné použití jsou dodávány od firem třetích stran.



Obrázek 3: Příslušenství MiR [11][12][13]

1.3.2 KUKA

KUKA je společnost zabývající se vývojem a výrobou automatizačních strojů pro zvýšení efektivity výrobního procesu. Působí v automobilovém průmyslu, elektronickém průmyslu, energetickém průmyslu, zdravotnictví, kovoprůmyslu a v mnoha dalších odvětvích. Zabývá se především výrobou robotických systémů, výrobních strojů, výrobních linek, ale také mobilními roboty. Mobilní roboty od společnosti KUKA jsou plně připraveny pro koncept průmyslu 4.0. Dokážou pracovat inteligentně, autonomně a jsou schopni najít cíl své cesty a ke svému cíli dojet. Jejich pohyb je zdokonalen pomocí technologie KMP omniMove (speciální kola), která umožňuje manévrovatelnost mobilního robota v každém směru. Díky této technologii lze zredukovat potřebný prostor pro pohyb robota až o 50 procent. V nabídce lze nalézt mobilní roboty určené pro logistiku, nebo mobilní roboty vybavené robotickým ramenem. [14][15]

Pro přepravu poskytuje KUKA nabídku řadu bezobslužných transportních systémů. Jedná se o plně autonomní dopravní systém, schopný plně automatické logistiky skladů či výroby. Pro přepravu se využívají autonomní plošiny, které umožňují přepravovat náklad od 100 kg až 100 tun. Hlavní řídicí systém je založen na umělé inteligenci, která je schopná efektivního a rychlého řízení. Tento systém poté řídí všechny mobilní roboty. Systém dokáže reagovat na měnící se poptávku a optimalizovat dle toho proces dopravy.



Obrázek 4: Mobilní robot KUKA KMR iiwa [16]

Jako příklad robota, který je vybaven robotickým ramenem, bych uvedl autonomního robota KMR iiwa. Jedná se o kombinaci mobilní autonomní plošiny a citlivého robota LBR iiwa. Tato kombinace zajišťuje maximální pohyblivost robota. Mobilní plošina je vybavena senzory, které neustále monitorují své okolí a zajišťují bezpečný pohyb. Při střetu s předmětem, či člověkem je robot ihned automaticky zastaven. Díky pokročilému systému navigace se KMR iiwa dokáže vyhnout každé překážce a dojet na potřebné místo. Robotické rameno je vybaveno momentovými senzory na všech sedmi osách, které zaručují bezpečné zastavení pohybu při sebemenším kontaktu ramena s okolními předměty, či člověkem. Díky tomu umožňuje provozovat robotické rameno bez ochranného oplocení. Jako příklad využití tohoto typu robota je zásobování pracoviště potřebnými komponenty.



Obrázek 5: Mobilní robot KUKA KMR QUANTEC [17]

Velmi odlišným robotem je KMR QUANTEC. Jedná se o mobilního robota skládajícího se z mobilní plošiny KUKA omniMove o nosnosti až 7 tun a robota KR QUANTEC 150 R3300 prime s nosností 150 kg a dosahem ramene až 3,3 metru. Jedná se o opravdu velkého robota, který je vhodný především pro práci se zvláště těžkými a velkými díly. I přes tyto velké rozměry se dokáže mobilní robot pohybovat do pozice na milimetr přesně. Robota lze využít pro manipulaci, svařování, kontrolu produktů, řezání, montáž, lakování a další oblasti použití.[16][17]

1.3.3 Amazon robotics (Kiva Systems)

Kiva Systems byla firma zabývající se automatizací skladových systémů. Firma byla později odkoupena Amazonem a přejmenována na Amazon robotics. Toto nově vzniklé oddělení Amazonu vyvíjí a provozuje mobilní roboty a AGV pro vlastní sklady. Dle posledních dat z roku 2019 nyní fungují ve skladištích Amazonu přes 200 000 mobilních robotů.



Obrázek 6: Mobilní robot DU1000[19]

První mobilní robot nazvaný DU1000 je robot ještě od původní společnosti Kiva Systems (Obrázek 6). Ten byl dodáván do skladů Amazonu a dodnes je používán. Jedná se o poměrně malého robota, který je dlouhý 75 cm, široký 60 cm a vysoký 30 cm. Jeho náplní práce je převážení polic se zbožím. Po obdržení požadavku zajede robot pro konkrétní polici, kterou pomocí speciálního zdvihového mechanismu nadzvedne. Polici poté převezve na požadované pracoviště. Pracovník z police odebere potřebné zboží a robot opět odveze polici zpět do skladu. Jedná se o velice efektivní řešení, jak vychystávat zboží ze skladu o tisících unikátních položkách. Robot je schopen pohybovat se maximální rychlostí 5 km/h a celkově uzvedne 450 kg. Pohyb robota po skladu je řízen pomocí

centrálního systému, takže robot spíše odpovídá konceptu AGV. Robot je řízen pomocí kombinace prvků. Jedná se o řízení pomocí laserů, IR senzorů a QR kódů. Pro pohyb v prostoru využívá lasery a IR senzory. QR kódy jsou umístěny na podlaze v pravidelných vzdálenostech. Každý QR kód obsahuje označení pozice, kde má robot vzít, nebo zavést polici. Pro přečtení QR kódů je robot vybaven kamerou s přisvětlovacími diodami. Jelikož by kolize jediné police mohla způsobit značné škody, je robot vepředu a vzadu vybaven senzory nárazu. Jedná se o opravdu jednoduché, ale zato velmi účinné řešení tohoto senzoru. Je zde využita gumová hadice, ve které je umístěn senzor tlaku. Pokud by robot narazil do překážky, dojde ke zvýšení tlaku v hadici a ihned dojde k zastavení robota. Tato zpráva je poté poslána také do centrálního systému, který upozorní další roboty na nehodu. [18][19]

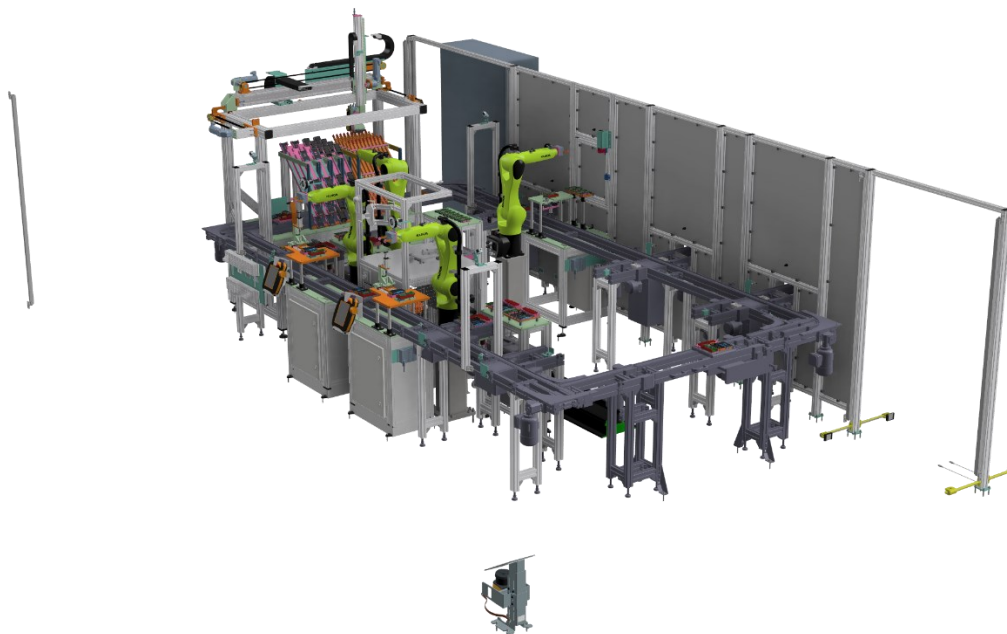
Nástupcem původního robota DU1000 je model Pegasus, který pochází již z dílny Amazon Robotics. Tento nový model je ve všech směrech zdokonalený původní model. Zmenšila se jeho výška z 30 na 19 cm, což znamená o 10 cm více místa pro uložení zboží. Dokáže unést 560 kg, což je o 90 kg více než předchozí model. A dokázali snížit cenu výroby robota na polovinu. Nový model je nyní nasazován do nových skladů, nebo jako náhrada starých modelů.



Obrázek 7: Mobilní robot Amazon robotics – Pegasus [19]

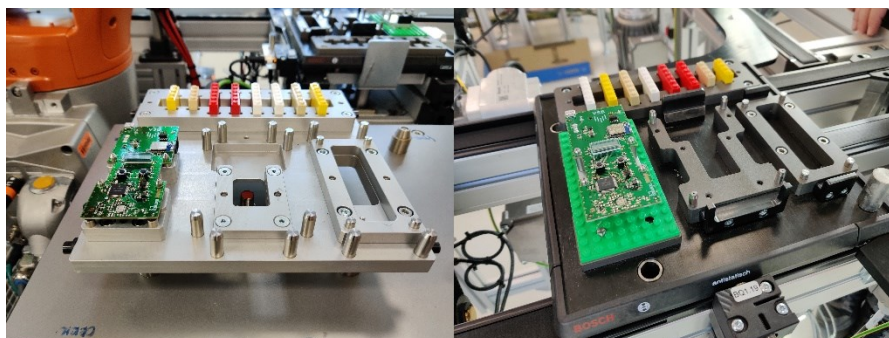
2 Analýza využití mobilních robotů ve Smartfactory

Smartfactory je učebna, umístěna v nové budově CPIT TL3. Jedná se o testbed nových technologií ve výrobě, robotice a průmyslu 4.0. Součástí SmartFactory je automatizovaná výrobní linka obsahující digitalizovaný výrobní proces s prvky Industry 4.0. Výrobní linka se stará o výrobu dvou typů produktů, které jsou popsány v následující kapitole 2.1 Produkty . Linka umožňuje sestavení výrobku za pomoci plně automatizovaného procesu, otestování produktu, kontrolu produktu, ale také rozložení výrobku.



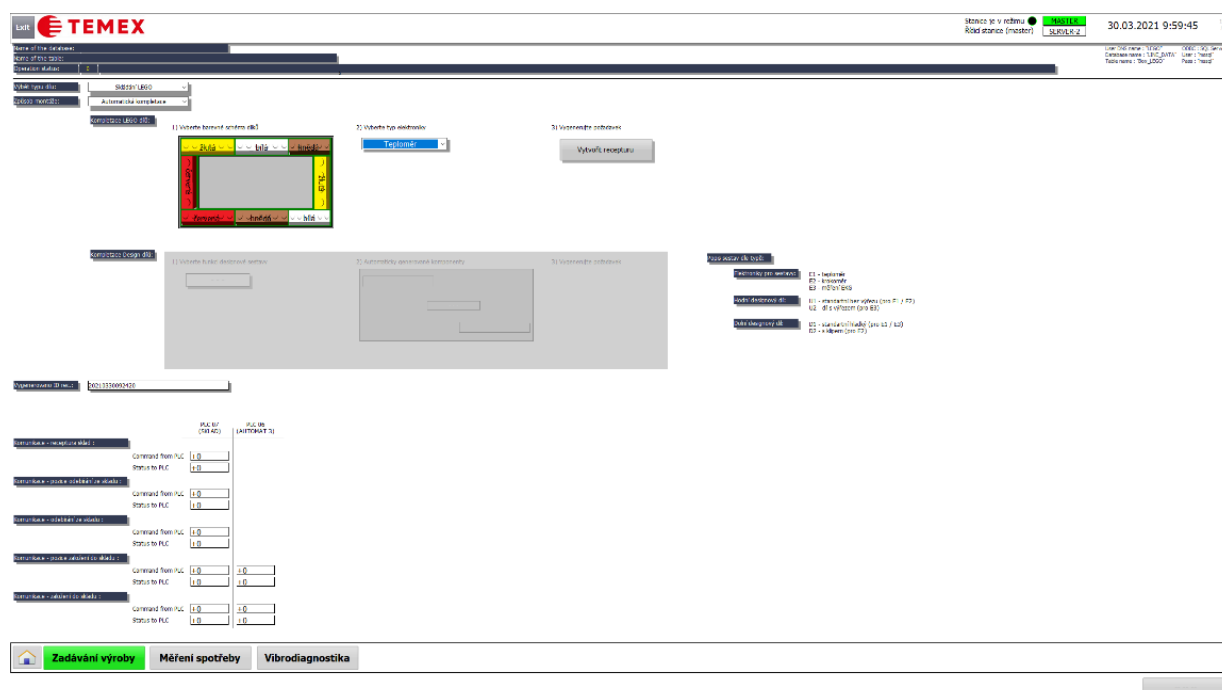
Obrázek 8: 3D model výrobní linky

Jednotlivé komponenty potřebné na výrobu produktů jsou uloženy ve skladu. Komponenty potřebné pro výrobky jsou umísťovány na jednu z palet (Obrázek 9), na kterých se komponenty pohybují mezi jednotlivými stanovišti výrobní linky. Pro překládání komponent, samotných výrobků, ale i celých palet jsou využívány robotická ramena KUKA. Pro přepravu komponent a palet s komponenty je robotické rameno vybaveno dvojicí nástrojů, které se v procesu výroby automaticky mění. Výrobní linka obsahuje dvojici stanovišť pro automatickou montáž a dvojici stanovišť pro manuální montáž. Stanoviště pro automatickou montáž slouží pro sestavení výrobků z jednotlivých komponent. Stanoviště pro manuální montáž slouží pro ruční sestavení výrobků a obsahuje panel, který zobrazuje postup, jak má být výrobek sestaven. Další stanoviště se stará o zpětné rozložení výrobků a uložení komponent zpět na paletku. Po rozložení produktu jsou komponenty z paletky opět uloženy do skladu. Výrobní linka je vybavena také testovacím stanovištěm, kde lze složený výrobek otestovat. Na stanovišti je možné otestovat desku plošných spojů za pomoci automatického testeru, nebo provést optickou kontrolu finálního výrobku pomocí kamer.



Obrázek 9: Paletky pro přepravu komponentů

Požadavek pro zahájení výroby výrobků je zadáván přes vizualizaci z řídicího pracoviště. Při objednávce výrobku je možné zvolit typ výrobku a elektroniku, kterou bude výrobek obsahovat. V případě LEGO produktu lze zvolit barvu kostek, které budou na výrobku umístěny. Výrobek může obsahovat elektroniku pro funkci krokoměru, teploměru, nebo měřiče EKG.

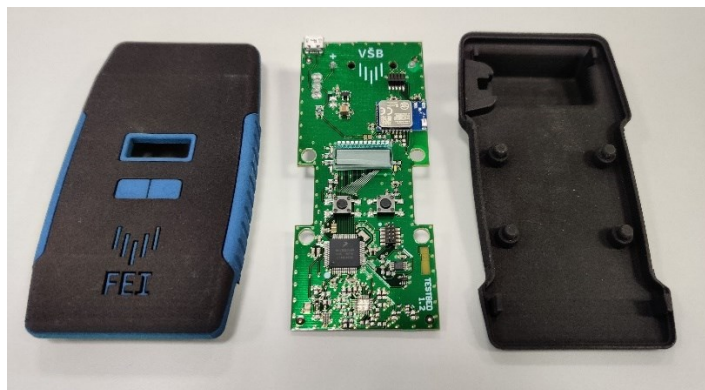


Obrázek 10: Vizualizace pro zadání výroby produktu

2.1 Produkty výrobní linky

2.1.1 Design produkt

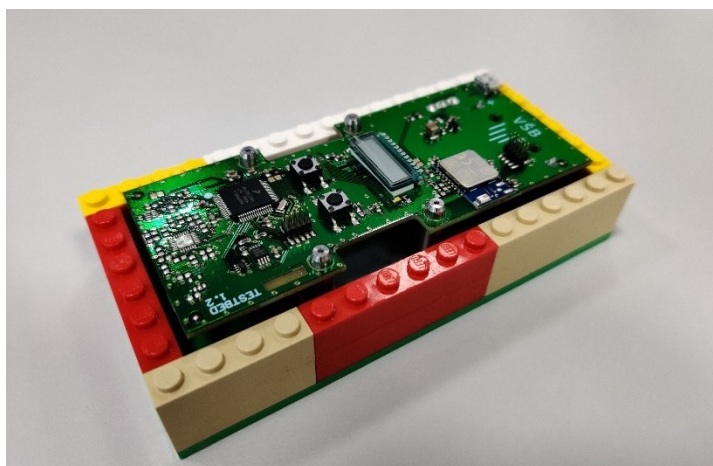
Prvním produktem výrobní linky je design produkt, který se skládá ze tří komponent. Výrobek obsahuje jeden z typů elektroniky (krokoměr, teploměr, EKG), který je následně vložen mezi dvojici designových dílů. Po složení si výrobek přebírá zákazník, který si produkt objednal a již nedochází k opětovnému rozkládání výrobku.



Obrázek 11: Design produkt

2.1.2 LEGO produkt

Druhým výrobkem je LEGO produkt, který nabízí více možností individuálního výběru. Stejně jako při design produktu lze vybrat, jaký typ elektroniky bude produkt obsahovat (krokoměr, teploměr, EKG). Jako další lze zvolit barvu osmi kostek, které budou na produktu umístěny. Po osazení kostek na základní desku je do vzniklého „rámečku“ vložena elektronika. Hotový produkt je prezentován po prostorech Smartfactory a je následně vrácen zpět do linky, kde je produkt rozložen na jednotlivé komponenty, které jsou opět uloženy do skladu.



Obrázek 12: LEGO produkt

2.2 Využití průmyslového mobilního robota

Autonomní mobilní robot v kombinaci s automatizovanou výrobní linkou nabízí možnost plně automatizovaného procesu výroby a následného doručení výrobku. Mobilní robot je schopen převzít hotový výrobek z prostoru linky a doručit ho na požadované místo.

Mobilní robot bude výrobek přebírat přímo v prostorách linky, kde automaticky dojede. Pro přemístění výrobku z pásu výrobní linky na mobilního robota slouží pohyblivé robotické rameno KUKA, které je umístěno ve středu výrobní linky. Oproti ostatním robotickým ramenům je vybaveno pojezdem, díky kterému se dokáže pohybovat po celém prostoru výrobní linky.

Pokud linka dokončí montáž výrobku, bude výrobek za použití robotického ramena přemístěn na mobilního robota. Při přemísťování výrobku bude mobilní robot připraven na přesně dané pozici v lince. Pozice se nachází v poměrně úzkých prostorech pod dopravníkovým pásem (Obrázek 13). Do této pozice bude muset mobilní robot autonomně najíždět s vysokou přesností.



Obrázek 13: Prostor pro předávání výrobku na mobilního robota

Po obdržení výrobku se bude mobilní robot pohybovat dle konkrétní implementace. Návrhy vhodných implementací jsou popsány v následující kapitole Návrh implementace mobilních robotů do Smartfactory.

2.3 Mobilní roboty MiR

Mobilní roboty, kterými je pracoviště Smartfactory vybaveno jsou roboty od společnosti Mobile Industrial Robots (MiR). Jedná se o autonomní průmyslové mobilní roboty MiR100 a MiR250. Mobilní roboty jsou určené pro účely přepravy a pro automatizaci logistiky. Jejich označení plyne z hmotnosti, kterou dokážou převést (100 kg a 250 kg). Oba modely obsahují pokročilé senzory, díky kterým se robot autonomně pohybuje v prostředí a reaguje na okolní překážky. V následující tabulce jsou uvedeny základní informace o obou modelech.

Tabulka 2: Specifikace mobilních robotů MiR100 a MiR250 [20][21]

Model	MiR 100	MiR 250
Délka (mm)	890	800
Šířka (mm)	580	580
Výška (mm)	352	300
Hmotnost (kg)	70	83
Max. nosnost (kg)	100	250
Max. rychlost (km/h)	Dopředu: 5,4 Dopředu: 1	7,2
Poloměr otáčení (mm)	520	neuvedeno
Přesnost najetí do pozice (mm)	+/- 50	neuvedeno
Doba provozu na jedno nabití (h)	10	Bez zátěže: 17,4 Plně zatížen: 13
Rozsah okolní teploty (°C)	+5, +40	+5, +40
I/O konektory	USB, Ethernet	4x digitální vstup 4x digitální výstup Ethernet, Aux (emergency stop)
Safety I/O konektory	-	6x digitální vstup 6x digitální výstup
WiFi	Ano	Router, adapter - 2.4 GHz, 5 GHz
Bluetooth	4.0 LE	4.0 LE
SICK microScan3 safety system	2x S300 (360°)	2x SICK laserové scannery (360°)
3D camera	2x Intel RealSense™	2x Intel RealSense D435
Ultrazvukové senzory	4x	8x

2.4 Autonomní mobilní robot MiR100

Pro obsluhu Smartfactory je použit mobilní robot model MiR100. Jedná se o model s maximální nosností 100 kg a pro účely obsluhy automatické linky je doplněn o nadstavbu, na kterou budou pokládány výrobky z výrobní linky.



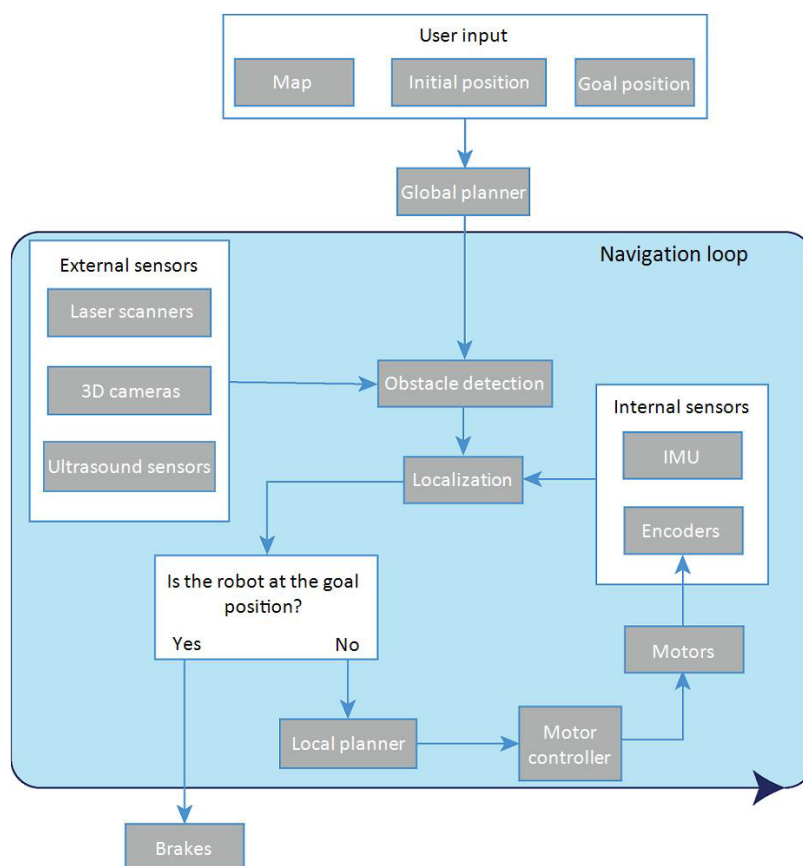
Obrázek 14: mobilní robot MiR100

2.4.1 Ovládání / programování robota

Veškerá konfigurace a nastavování mobilních robotů MiR, MiR FLEET, nebo WISE modulu se provádí přes webové rozhraní. Do webového rozhraní každého zařízení se dá dostat pomocí zadání konkrétní IP adresy zařízení do prohlížeče (a to v případě, že je zařízení připojeno do konkrétní sítě). V případě konfigurace mobilního robota přes jeho vlastní WI-FI síť se webové rozhraní nachází na adrese „mir.com“. Každé webové rozhraní je rozdílné dle potřeb konkrétního zařízení, ale stylově jsou si velmi podobné.

2.4.2 Systém navigace

Systém navigace je jádro celého autonomního mobilního robota. Jeho cílem je naplánovat cestu z počátečního bodu A do cílového bodu B. Tyto body jsou určeny uživatelem, ale cesta je již plánována zcela autonomně a automaticky. Za určení správné trasy a navigaci robota až do cíle je zodpovědný pokročilý systém navigace, který je složen z vícero částí. Následující diagram zobrazuje princip funkčnosti systému.



Obrázek 15: Princip navigace mobilního robota [20]

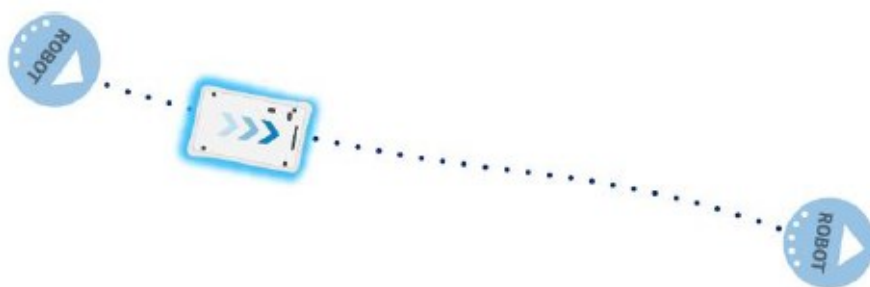
Vstup od uživatele

Aby dokázal systém navigace najít cestu, potřebuje inicializační data, podle kterých bude trasu plánovat. Od uživatele je zadána informace, kde má robot dojet. Pro naplánování trasy musí ale mobilní robot znát také prostor ve kterém se pohybuje a svou aktuální pozici. Pro orientaci v prostoru slouží virtuální mapa, která je uložena v paměti robota a obsahuje údaje o všech stěnách a překážkách. Tuto mapu je nutné vytvořit před začátkem používání mobilního robota. Do virtuální mapy se následně

vkládají pozice, na které má robot jezdit a mnoho dalších prvků. Tvorba konkrétní mapy pro SmartFactory je popsána v bodě 4.1.1 Vytvoření virtuální mapy.

Globální plánování

Po získání všech dat pro začátek plánování trasy, začne samotné plánování trasy, které má na starost systém globálního plánování. Jedná se o algoritmus, který vygeneruje trasu do požadovaného bodu. Podstatné však je, že systém globálního plánování vygeneruje cestu do cílového bodu pouze jednou a řídí se pouze pevnými překážkami, které jsou zaznamenány ve virtuální mapě prostoru. To znamená, že pokud v prostředí vznikne pro robota nová překážka, která není zaznamenána v jeho virtuální mapě, systém globálního plánování o této překážce neví a naplánuje cestu i přes tuto překážku. Naplánovaná cesta je v mapě, nebo dashboardu vyobrazena pomocí teček. Pokud nedokáže najít cestu, je plánování ukončeno s chybovou hláškou a celá mise je pozastavena.



Obrázek 16: Naplánována globální trasa mobilního robota [20]

Lokální plánování

Systém lokálního plánování běží, na rozdíl od globálního plánování, v nepřetržitém cyklu po celou dobu provozu robota. Jeho úkolem je reagovat na překážky v bezprostředním okolí robota, které jsou snímány za pomoci senzorů a které nejsou zaznamenány ve virtuální mapě. V případě detekce překážky na trase je úkolem lokálního plánování určit trasu, kterou může mobilní robot překážku objet. Pokud je překážka mimo dosah, nebo mimo zorné pole senzorů, systém s touto překážkou nepočítá a nebere jí v potaz. Z trasy, která je vytvořena za pomoci globálního plánování, uhýbá s robotem pouze za účelem objetí překážky a poté se opět vrací na původně vygenerovanou trasu. Trasa mobilního robota může být zablokována takovým způsobem, že systém nedokáže najít objíždnou trasu. V takovém případě má mobilní robot nastavený počet pokusů, kolikrát se pokusí najít novou trasu. Trasu může zablokovat například člověk, který jenom prochází a cestu následně uvolní. Pokud mobilní robot nenajde cestu v žádném z nastavených pokusů, pozastaví aktivní misi a čeká na další instrukce.

2.4.3 Detekce překážek

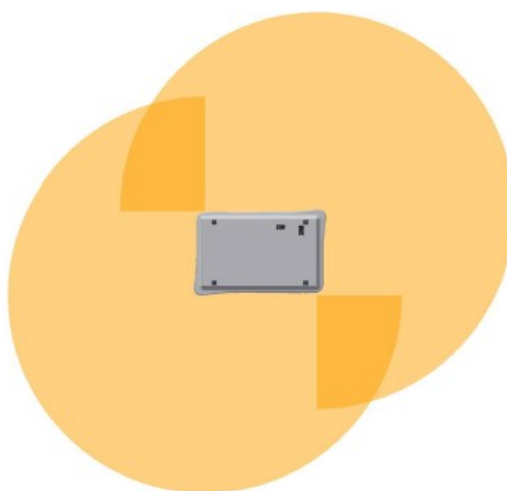
Systém detekce překážek je aktivní neustále a jeho hlavním účelem je detekce překážek v okolí robota. Informace o aktuálním rozmístění okolních překážek jsou taky využívány při určování aktuální pozice mobilního robota v mapě, nebo při umisťování mobilního robota do mapy. Pro detekci překážek jsou využívány senzory třech typů. Jedná se o laserové senzory, ultrazvukové senzory a 3D kamery.

Laserové senzory

Mobilní robot MiR100 je vybaven dvojicí laserových senzorů SICK S300. Každý senzor má zorný úhel 270° a jsou umístěny do protilehlých rohů mobilního robota tak, aby pokryly celých 360° okolo robota (Obrázek 17).

Tyto senzory však mají následující omezení:

- Dokážou detekovat překážky pouze ve výšce 200 mm od podlahy
- nedokážou detekovat průhledné překážky (sklo)
- u některých reflexních povrchů mohou být data nepřesná
- při vystavení senzoru přímému světlu může dojít k detekci falešných překážek.



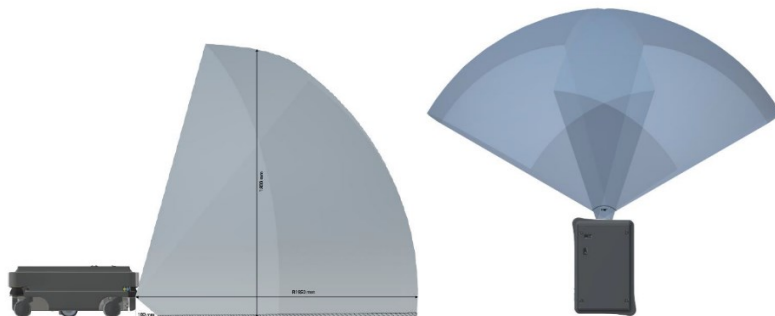
Obrázek 17: Zorný úhel laserových senzorů [20]

3D kamery

Model MiR100 je na přední straně vybaven dvojicí Intel RealSense™ kamer. Kamery jsou určené pouze pro navigaci v prostředí, nikoliv jako bezpečnostní senzory detekce překážek. Důležitou vlastností je možnost detekce výšky jednotlivých překážek v prostředí. Podle toho dokáže mobilní robot určit, zda se pod překážku vejde nebo ne. Výška mobilního robota se nastavuje ručně ve webovém rozhraní. Dvojice kamer zabírá prostor od 180 mm do 1950 mm před robotem se zorným úhlem 118° a prostor 1800 mm do výšky.

3D kamery mají následující omezení:

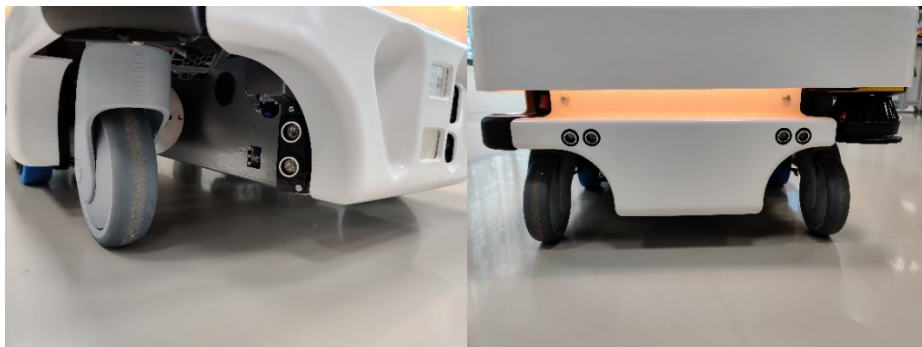
- oproti 360° laserových senzorů dokážou detekovat objekty pouze před mobilním robotem
- nedokážou detekovat průhledné nebo reflexní objekty
- nedokážou detekovat sestupné schodiště
- určení vzdálenosti může být nepřesné při detekci objektů s opakujícími se vzory
- při vystavení přímému světlu mohou být detekovány falešné překážky



Obrázek 18: Zorný úhel 3D kamer [20]

Ultrazvukové senzory

Ultrazvukové senzory jsou poslední senzory, kterými je MiR100 vybaven. Konkrétně je vybaven čtyřmi ultrazvukovými senzory. Dva senzory jsou umístěny na zadní straně mobilního robota a dva jsou umístěny před předními koly mobilního robota. Ultrazvukové senzory jsou použity na detekci překážek, které nebyly schopné detekovat laserový senzor, ani 3D kamery. Přední senzory dokážou detekovat překážky od 10 mm do 200 mm, zadní senzory detekují překážky ve vzdálenostech 10 mm do 350 mm.



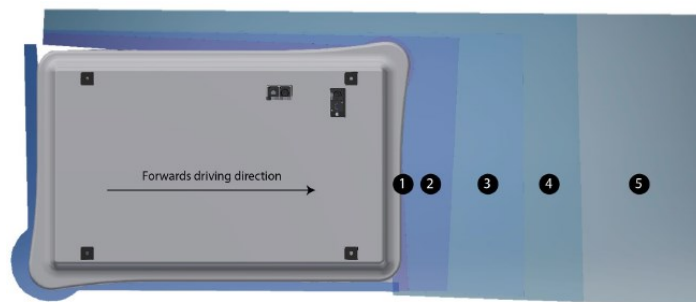
Obrázek 19: Ultrazvukové senzory

2.4.4 Rychlost pohybu

Rychlost pohybu mobilního robota má zásadní vliv na prostor, který robot před sebou kontroluje. Pokud jede mobilní robot malou rychlostí, hlídá si především prostor a překážky v jeho bezprostředním okolí. Pokud však jede mobilní robot vyšší rychlostí, hlídá mnohem větší prostor, aby stihl zabrzdit před případnou překážkou. Rychlost robota se automaticky mění podle prostředí, ve kterém se mobilní robot pohybuje a zda se pohybuje ve volném prostoru, nebo mezi překážkami. Maximální rychlost robota lze omezit za pomoci příkazů během tvorby mise.

Tabulka 3: Rychlostní zóny robota

Zóna	Rychlost (m/s)	Hlídaný prostor (mm)
1	-1,4 až 0,2	0 – 20
2	0,21 až 0,4	0 – 120
3	0,41 až 0,8	0 – 290
4	0,81 až 1,1	0 – 430
5	1,11 až 2	0 – 720



Obrázek 20: Rychlostní zóny robota [20]

2.4.5 Barevná signalizace

Mobilní roboty MiR jsou vybaveny RGB led páskem, který je umístěn okolo celého těla robota. Za pomoci dané barvy, či blikání, robot signalizuje aktuální stav, ve kterém se aktuálně nachází. Následující tabulka zobrazuje jednotlivé typy barevné signalizace.

Tabulka 4: barevná signalizace stavu mobilního robota [20]

Barva	Stav robota	Barva	Stav robota
Červená	Nouzový stop	Žlutá - slábnoucí	Vypínání robota
Zelená	Připraven na misi	Žlutá - blikání	Pohyb s vypnutou detekcí překážek
Tyrkysová	Jede na pozici	Fialová - žlutá	Chyba
Fialová	Cesta zablokována	Modrá	Manuální řízení
Bílá	Plánování cesty	Modrá - kolísavá	Mapování
Žlutá	Mise pozastavena	Bílá - žlutá - zelená	Signalizace nabíjení
Žlutá - kolísavá	Zapínání systémů	Bílá - kolísavá	Čeká na krok uživatele

2.4.6 Bezpečnost

Nouzové zastavení mobilního robota je řešeno za pomoci nouzového tlačítka, které je k robotovi připojeno. Při stisku tlačítka dojde k okamžitému zastavení mobilního robota. Bez připojeného nouzového tlačítka nelze mobilního robota provozovat. V případě nouzového zastavení, nebo jiného závažného přerušení pohybu robota je nutné použití reset tlačítka pro odblokování.

2.4.7 Nabíjení

Nabíjení mobilního robota patří k jeho každodennímu provozu a existuje několik způsobů, jak lze baterii mobilního robota dobít. Při zakoupení mobilního robota MiR100 je společně s robotem dodávána drátová nabíječka o výkonu 240 W (24 V, 10 A). Napájecí konektor pro drátovou nabíječku je umístěn pod krytkou, kterou je před nabíjením třeba sundat. Při použití drátové nabíječky trvá nabití mobilního robota MiR100 z 0 na 100 % přibližně 12 hodin. Drátová nabíječka má velkou nevýhodu nutnosti lidské obsluhy, aby připojila robota na nabíječku.

Tento problém řeší druhý typ nabíječky MiR Charge 24 V, která je umístěna v prostorech Smartfactory. Jedná se o externí nabíjecí stanici, ze které se dokáže mobilní robot nabít zcela autonomně bez nutnosti lidské obsluhy. Nabíjecí stanice dosahuje nabíjecího výkonu 600 W (24 V, 25 A) a podstatně urychluje proces nabíjení robota. Jak lze pozorovat z tvaru nabíjecí stanice (Obrázek 21), je do ní zabudován VL marker, který zajišťuje přesné najetí mobilního robota na napájecí kolíky (Tomu, co jsou markery se věnuji v kapitole 4.1.2 Komponenty virtuální mapy).



Obrázek 21: Nabíjecí stanice MiR Charge 24V

Na mobilním robotu jsou konektory pro napájení umístěné na přední straně robota. Kontakty jsou skryté pod ochranným krytem. Při najetí mobilního robota na napájecí kolíky se chránička mechanicky odsune a dojde k připojení na svorky mobilního robota. Po dokování robota na nabíječku se nabíjení nespustí automaticky, ale je nutné nabíjení spustit za pomoci příkazu v misi.



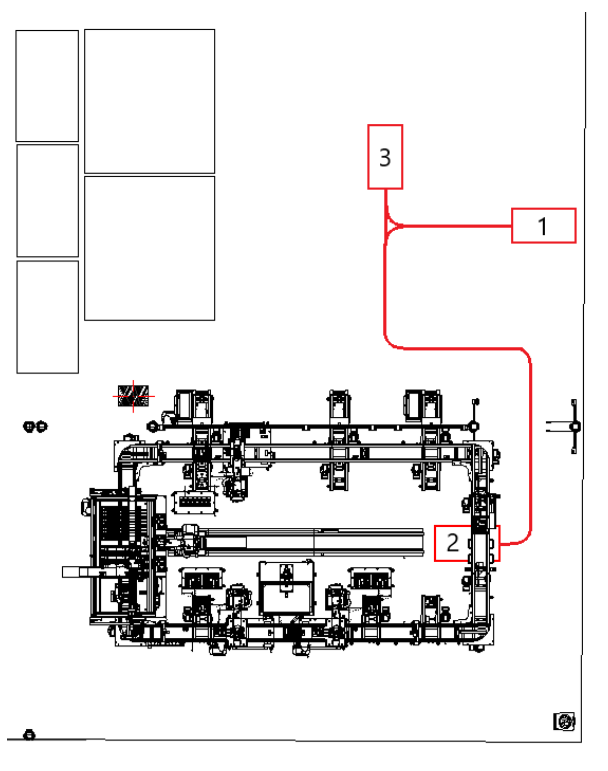
Obrázek 22: MiR100 – napájecí konektory pro MiR Charge 24V

3 Návrh implementace mobilních robotů do Smartfactory

Implementace průmyslových mobilních robotů do Smartfactory umožňuje následnou distribuci hotových produktů. Výrobní linka vyrábí dva typy výrobků. Jedná se o LEGO produkt a designový produkt. Výrobní linka neobsahuje žádné odběrové místo finálního produktu a je obklopena bezpečnostními prvky, které zamezují možnosti vstupu do prostorů linky. Z tohoto důvodu bude cestu produktu z linky k zákazníkovi obstarávat mobilní robot MiR100. Jelikož výrobní linka vyrábí 2 typy produktů, navrhnul jsem 2 možné implementace.

3.1 Doručení design produktu k zákazníkovi

Účelem první implementace mobilního robotu je zajistit dopravení hotového design výrobku z linky až k zákazníkovi. Ve výchozí pozici se bude robot nacházet před nabíjecí stanicí, nebo bude probíhat jeho nabíjení. Zákazník za pomoci vizualizace objedná produkt, který linka následně vyrobí a předá mobilnímu robotovi informaci, že je výrobek připraven. Mobilní robot dojede na pozici ve výrobní lince, kde mu bude výrobek za pomoci robotického ramene předán. Produkt poté odveze mimo prostor linky, kde si ho může z mobilního robota zákazník převzít. Jakmile zákazník odebere produkt, mobilní robot se přesune na pozici před nabíjecí stanicí, kde čeká na další zavolání od linky.



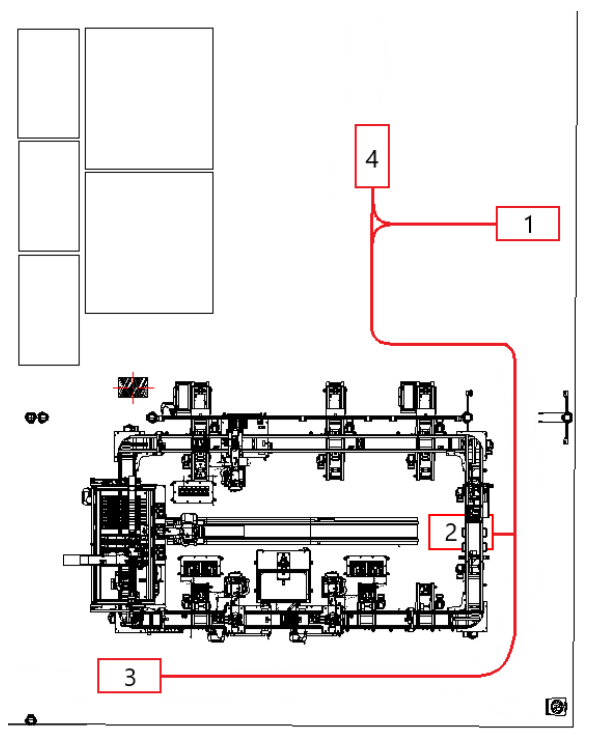
Obrázek 23: Trasa doručení design produktu

Tabulka 5: Pozice 1. implementace

Pozice	Popis
1	Výchozí pozice
2	Pozice přebírání produktu
3	Pozice doručení produktu

3.2 Presentace LEGO produktu

Druhá implementace mobilního robota zajišťuje prezentaci vyrobeného LEGO produktu v prostorech Smartfactory. Úkolem implementace je převzít hotový LEGO produkt, projet s ním danou trasu a následně produkt vrátit do linky. Robot se bude nacházet ve výchozí pozici před, nebo na nabíjecí stanici a čekat na signál, že je výrobek sestaven. Po obdržení signálu přijede mobilní robot na nakládací pozici v lince a přebere LEGO produkt. S produktem se projede okolo oken Smartfactory, následně vyjede mimo prostor linky, aby si případní sledující mohli produkt prohlédnout a poté se vrátí na pozici v lince. Na této pozici je produkt vyložen z mobilního robota a vrácen do výrobní linky, která produkt opět rozloží. V této implementaci je nutno, aby mobilní robot při vracení výrobku najel na pozici s velkou přesností. Robotické rameno bude produkt očekávat na stejném místě, kde produkt na robota položilo.



Obrázek 24: Trasa prezentace LEGO výrobku

Tabulka 6: Pozice 2. implementace

Pozice	Popis
1	Výchozí pozice
2	Pozice naložení / vyložení produktu
3	Pozice prezentace před okny
4	Pozice prezentace mimo linku

4 Realizace navržené úlohy

4.1 Virtuální mapa prostoru

Mobilní roboty MiR potřebují pro svou orientaci vytvořit virtuální mapu prostoru, ve kterém se bude robot pohybovat. Tato virtuální mapa obsahuje informace o překážkách, zónách, pozicích robota, markerech a dalších prvcích, které jsou pro řízení robota třeba. Virtuální mapu lze vytvořit přímo ve webovém rozhraní mobilního robota.

4.1.1 Vytvoření virtuální mapy SmartFactory

Po zvolení možnosti vytvoření nové mapy začne mobilní robot pomocí všech svých senzorů detekovat překážky v okolí a ukládat pozice překážek do mapy. Pro vytvoření kompletní mapy prostoru je nutné, za pomoci manuálního režimu, projít celý prostor a zaznamenat do mapy veškeré překážky, na které by mohl robot narazit. Jelikož se robot orientuje v mapě právě za pomoci pevných, neměnných překážek, doporučuje se jich mít v mapě alespoň 60 %. Pokud by se prostředí kolem robota měnilo příliš, mohl by se přestat v prostoru orientovat. Takové prostory mohou vzniknout například ve skladech, kde se palety zboží přemisťují na různé pozice. V takovém případě je nutné správné vytvoření virtuální mapy, nebo umístění orientačních (pevných, neměnných) bodů přímo do prostředí.

Po zaznamenání celého prostředí a všech překážek lze mapu dále upravovat. Zaznamenané překážky (či zdi) lze odstranit, nebo přidat nové. Mapa je zaznamenávána především laserovými senzory, které nedokážou detekovat sklo jako překážku (laserový paprsek projde skrz). Při vytváření mapy Smartfactory došlo k nezaznamenání skleněných dveří, a proto jsem do mapy ručně umístil pevnou zeď a jako pojištění také zakázanou zónu, aby nedošlo k nárazu robota do skla.



Obrázek 25: Virtuální mapa Smartfactory

4.1.2 Komponenty virtuální mapy

Po vytvoření virtuální mapy se do mapy vkládají komponenty, které dále řídí pohyby robota. Jedná se především o následující trojici komponent.

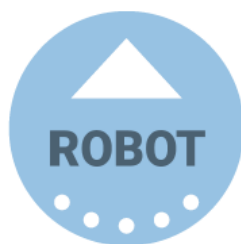
ZÓNY

Zóny slouží pro určení, jak se má robot chovat v konkrétní části mapy.

- Zakázaná zóna – oblast do které robot nemůže jet
- Nepreferovaná zóna – oblast, do které robot jede pouze v případě, že nemá jinou možnost
- Kritická zóna – oblast, ve které si robot bude dávat větší pozor na překážky; zóna je vhodná na průjezdy úzkými místy jako jsou dveře
- Jednosměrka – oblast, ve které je povolen pohyb jen jedním směrem

POZICE

Pozice slouží jako hlavní navigační body, na které jsou roboty posílány v průběhu misí. Pozice je v mapě definována pomocí X,Y souřadnic. Pozice obsahuje taky informaci, kterým směrem se má robot natočit po přijetí na pozici. Po přijetí mobilního robota na pozici bude předek robota orientován stejně, jako šipka na symbolu pozice v mapě (Obrázek 26). Pozici lze vytvořit za pomoci přímého vložení do mapy, zadáním souřadnic pozice, nebo lze vytvořit pozici, která kopíruje aktuální polohu robota.



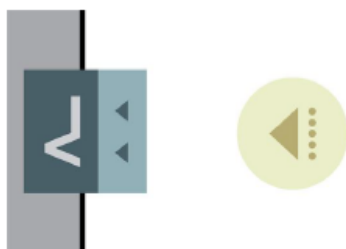
Obrázek 26: Symbol pozice ve virtuální mapě

MARKERY

Markery jsou používány v případě, že je třeba přesné najetí robota na určitou pozici. Markery jsou stejně jako pozice definovány za pomoci X,Y souřadnic. Oproti pozicím, které jsou pouhými body ve virtuální mapě, jsou markery fyzické předměty, přesně definovaného tvaru, které jsou umístěny do prostředí, ve kterém se robot pohybuje. Díky markerům se robot orientuje v prostředí přesněji a dokáže najet na konkrétní místo s přesností v rámci milimetrů. Mobilní roboty MiR mají definované 4 typy markerů. Jedná se o V, VL, L a Bar-marker. Každý typ má přesně daný tvar a rozměry. Markery jsou primárně určeny na označení míst, kde je třeba, aby robot přesně najel. Například VL marker je použit také na nabíječce, kde je potřeba přesného najetí na napájecí piny. Pro přidání markeru do mapy je nutné přijet robotem před marker, vložit marker správného typu do mapy a zvolit detekci markeru. Robot pomocí senzorů rozpozná přesnou pozici markeru a přidá ho do mapy. Současně s markerem se v mapě vytvoří vstupní pozice (ve výchozím nastavení je skrytá), která je umístěna před markerem a má svůj význam pro dokování mobilního robota na marker.

Příjezd robota na marker funguje následovně. Robot dojede na vstupní pozici markeru stejně, jako by se jednalo o klasickou pozici. Po přijetí na vstupní pozici se bude nacházet zhruba metr před markerem. V tento moment začíná takzvanou dokovací sekvenci. Již se nepohybuje za pomoci virtuální mapy, ale přímo za pomoci fyzického markeru v prostředí. Za pomoci 3D kamer a senzorů snímá jeho tvar, hrany a další specifické rysy daného markeru. Za neustálého snímání tohoto markeru se postupně

k markeru blíží, až dojde na žádanou pozici. Díky snímání pevně daného objektu, jako je marker, dokáže mobilní robot najet do pozice s přesností na jednotky milimetrů.



Obrázek 27: Symbol VL Markeru a jeho vstupní pozice

4.2 Začlenění mobilních robotů do sítě SmartFactory

Komunikace mezi mobilními roboty a ostatními zařízeními probíhá přes Wi-Fi rozhraní. Mobilní robot nabízí dvojici možností komunikace. První možností je připojení zařízení (tabletu, mobilu, notebooku) přímo na interní Wi-Fi síť, kterou robot vysílá a přes webové rozhraní robota konfigurovat. Druhá možnost, kterou také využijí při své práci, je nastavit, aby se robot automaticky po zapnutí připojoval do externí Wi-Fi sítě. To přináší řadu výhod. Pokud je robot do takové sítě připojen, dokáže dále komunikovat s dalšími zařízeními na síti, popřípadě s dalším mobilním robotem (Viz. Bod 5 - Ověření možností kooperace dvou mobilních robotů).

SmartFactory má vlastní síť, na které se nachází veškeré řídicí systémy, robotická ramena, senzory a další zařízení v lince. Veškeré zařízení ve výrobní lince jsou však připojeny pomocí LAN kabelu, což je pro připojení mobilních robotů nedostačující. Z tohoto důvodu jsem do sítě výrobní linky přidal Wi-Fi router, který síť rozšíří o možnost bezdrátového připojení. Síť se jmenuje „MiR“ a je nastavena tak, aby se na ní mobilní roboty po zapnutí automaticky připojili. I když je Wi-Fi router součástí sítě výrobní linky, je napájen externě, aby síť pro mobilní roboty fungovala i při vypnutí výrobní linky. Do této sítě jsou připojeny také dvě další zařízení, které komunikují přímo s mobilními roboty.

Prvním zařízením je MiR Fleet, který se stará o kooperaci vícero mobilních robotů. Druhým zařízením je WISE modul. Ten obstarává externí komunikaci s mobilním robotem pomocí digitálních vstupů a výstupů. Konkrétní využití WISE modulu je popsáno v bodě 4.3 - Komunikace se SmartFactory.

Z důvodu umístění Wi-Fi routeru do sítě výrobní linky musí být dodrženo striktní rozdělení IP adres, aby nedošlo ke konfliktu s jinými zařízeními v síti. Na routeru je aktivní DHCP server, který přiděluje IP adresy automaticky. To však není pro mé použití vhodné, jelikož může DHCP server přidělit stejnou adresu, jaká je již použita ve výrobní lince. Proto jsem zvolil variantu rozdělení statických IP adres. DHCP server jsem využil pouze pro automatické přidělování IP adres zařízením jako je mobil, notebook a další, z kterých budou uživatelé mobilní roboty konfigurovat. Má však omezený rozsah IP adres tak, aby nebyly v konfliktu s již používanými adresami. Jednotlivé adresy jsou uvedeny v následující tabulce a v diagramu sítě.

Tabulka 7: Rozdělení IP adres pro bezdrátovou síť MiR

Zařízení	IP adresa
Asus Wi-Fi router	192.168.1.7
MiR FLEET	192.168.1.8
MiR WISE	192.168.1.200
Mobilní robot MiR100	192.168.1.100
Mobilní robot MiR250	192.168.1.250

4.3 Komunikace se SmartFactory

Úkolem mobilního robota je automaticky přebírat výrobky od výrobní linky a převážet je na určené místo. K této funkci je třeba zajistit komunikaci mezi linkou a mobilním robotem. Komunikaci zajišťuje WISE modul, který byl dodán společně s mobilním robotem MiR100. Konkrétně se jedná o model WISE-4050/LAN, který je vybaven 4 digitálními vstupy a 4 digitálními výstupy. Modul je zapojen v rozvaděči linky a pomocí digitálních vstupů a výstupů komunikuje s PLC, které ovládá linku. Pro spárování mobilního robota s WISE modulem je nutné jejich umístění do stejné sítě. Po spárování lze do misí robota zadávat instrukce pro čtení digitálních vstupů, nebo změnu digitálního výstupu.

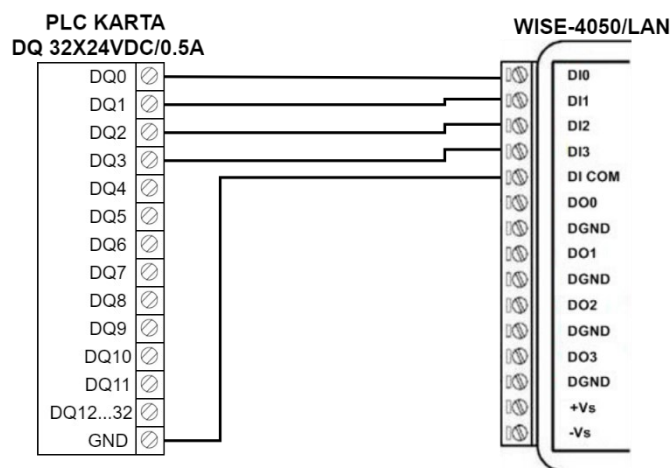
Jelikož je pro komunikaci mezi mobilním robotem a výrobní linkou použito 8 digitálních signálů (stavy 0 a 1), je nutné, aby jak strana mobilního robota, tak strana linky a PLC, znali přesný účel daného signálu. Ve spolupráci s firmou TEMEX, která má na starosti linku ze strany PLC, jsme došli k dohodě, jaké jsou funkce daných signálů. Všechny signály potřebné pro komunikaci jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 8: Popis signálů komunikace (z pohledu WISE modulu)

Adresa	Popis funkce
DO0	Mobilní robot posílá signál, že je připraven u linky na převzetí výrobku
DO1	Mobilní robot posílá signál, že je připraven u linky na odebrání produktu (LEGO)
DO2	Mobilní robot posílá signál, že je připraven na zavolání od linky
DIO	Mobilní robot obdrží signál, aby přijel k lince
DI1	Mobilní robot obdrží signál, že je naložený/vyložený
DI2	Mobilní robot obdrží signál, že má naložen produkt
0 = DESIGN / 1 = LEGO produkt	

WISE modul je umístěn v rozvaděči linky, aby mohl být pomocí vstupů a výstupů napojen k PLC. K síti je připojen za pomoci lan kabelu. Napájen je za pomoci 24 V. Vstupy a výstupy jsou zapojeny dle následujících schémat.

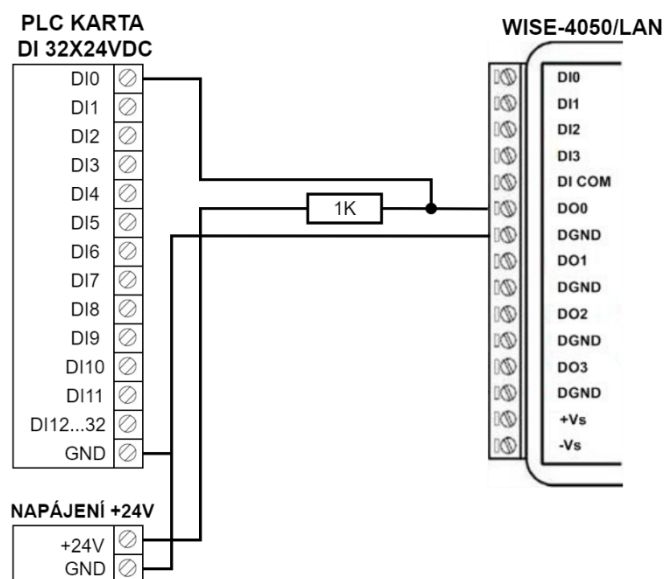
Digitální vstupy DI0 – DI3 WISE modulu jsou připojeny na digitální výstupy PLC. Pro zem je určen na WISE modulu společný pin DI COM. Každý digitální vstup je dimenzován na $\pm 0-30 V_{DC}$. Při logické jedničce je na výstupu PLC 24 V_{DC}, což splňuje limity WISE modulu a je možné přímé propojení.



Obrázek 28: Schéma zapojení digitálních vstupů WISE modulu

Digitální výstupy WISE modulu jsou využity pro ovládání digitálních vstupů do PLC. WISE moduly se vyrábí v několika verzích a mají 2 verze digitálních výstupů. První typ je označován jako „digitální výstup“ a druhý typ je označován jako „reléový výstup“. WISE modul 4050 obsahuje 4 digitální výstupy. Z tohoto označení lze předpokládat, že po přepnutí digitálního výstupu do logické jedničky, bude možno na výstupních svorkách změřit napětí, které logickému stavu odpovídá. Na výstupu se však žádné napětí nenachází a výstup se i přes jeho označení chová spíše jako relé, které spíná obvod. Proto je nutné do obvodu zapojit zdroj napětí, který dodá požadované napětí na vstup PLC.

Modul digitálních vstupů PLC požaduje pro logickou jedničku napětí o velikosti mezi +11 V a +30 V. Digitální výstupy WISE modulu jsou dimenzovány na $\pm 0-30 V_{DC}$ při maximálním proudu 400 mA. Pro omezení proudu v obvodu je před WISE modul umístěn rezistor o velikosti 1 k Ω . Při napájení za pomoci 24 V a po vzniklém úbytku napětí lze na výstupních svorkách naměřit napětí 18 V, které je pro PLC dostatečné, aby ho rozpoznalo jako logickou jedničku. Obvodem poteče proud 18 mA, který vyhovuje limitům WISE modulu a na rezistoru bude výkon 0,432 W, který je při použití 0,6 W rezistoru také v limitech.



Obrázek 29: Schéma zapojení digitálního výstupu DO0 WISE modulu

4.4 Tvorba programu

Program pro mobilní roboty MiR je tvořen pomocí jednotlivých příkazových komponentů, jako jsou logické funkce, funkce přesunu, funkce dokování a další. Tyto funkce jsou následně seskupovány do takzvaných „mísí“. Mise robota je tedy seskupení příkazů, které určují, co má robot v konkrétní misi dělat. V rámci mise jsou jednotlivé příkazy vykonávány postupně a pokud již robot splnil všechny příkazy, je mise ukončena. Mise jsou robotovi spouštěny přes webové rozhraní a je možné přidat do fronty více mís, které má robot splnit. Pokud nemá mobilní robot žádnou misi ve frontě, ani nevykonává žádnou aktivní misi, stojí na místě a čeká na přidělení mise.

Základní příkazy pro tvorbu programu

- Funkce přesunu
 - move (přesun) – přesun mobilního robota na pozici v mapě
 - docking (dokování) – přesun mobilního robota na marker, nebo nabíjecí stanici
 - relative move – přesun mobilního robota
- Logické funkce
 - charging (nabíjení) – spuštění nabíjení mobilního robota
 - if – funkce rozhodování dle podmínky
 - loop – cyklus pro opakované vykonávání příkazů
- Ovládání I/O modulu (WISE modulu)
 - set output (nastavení výstupu) – sepnutí výstupu WISE modulu
 - wait for input (čekání na vstup) – detekce vstupu WISE modulu
- Další funkce
 - volání mise – provedení mise v jiné misi
 - light (světla) – nastavení stylu a barvy světel robota
 - sound (zvuk) – možnost, aby mobilní robot přehrál daný zvuk

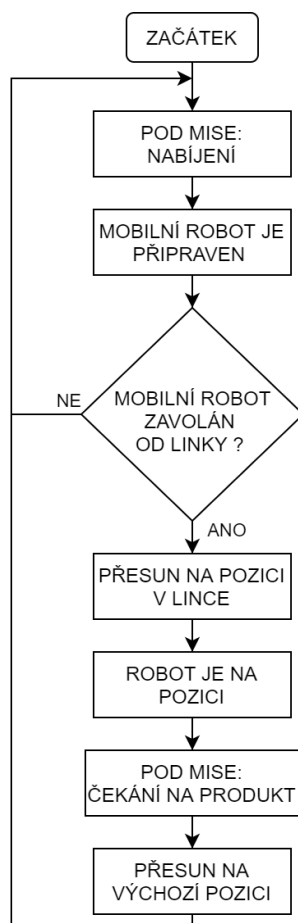
Mobilní robot MiR100 má za úkol obsluhu automatické výrobní linky ve SmartFactory a odebírání vyrobených produktů. Dle navržených implementací (kapitola 3 - Návrh implementace mobilních robotů do Smartfactory) odebírá mobilní robot z linky dvojici produktů. LEGO produkt a design produkt. Každý z dvojice produktů má jinou finální pozici doručení a mobilní robot musí rozeznávat, který produkt aktuálně doručuje. Tuto informaci obdrží od linky. Mobilní robot si také musí hlídat úroveň baterie, aby mohl fungovat nepřetržitě a byl vždy připraven pro odebrání produktu.

Pro obsluhu linky by bylo možné vytvořit jednu velkou misi, která by obsahovala veškeré příkazy potřebné pro obsluhu linky. Taková mise by byla velice nepřehledná a obsahovala by příliš hodně příkazů. Z tohoto důvodu jsem rozdělil obsluhu linky do 5 mís. Základem je hlavní mise, která si dle potřeby volá další pod mise, pro provedení konkrétního úkonu.

4.4.1 Hlavní mise

Hlavní mise zastřešuje kompletní obsluhu výrobní linky. Pokud je třeba zahájit obsluhu, je nutno v robotovi spustit právě hlavní misi. Mise obsahuje smyčku, která zajišťuje obsluhu linky do té doby, nežli je mise ukončena. Pro nepřetržitý chod je součástí pod mise, která kontroluje stav baterie a v případě nutnosti pošle robota na nabíjecí stanici. Mise dále zajišťuje prvotní komunikaci s linkou a určuje, kdy je mobilní robot připraven na odebrání výrobku. Informace, že je mobilní robot připraven, je signalizována za pomoci digitálního výstupu 2 (DO2). V případě aktivního digitálního výstupu 2 může

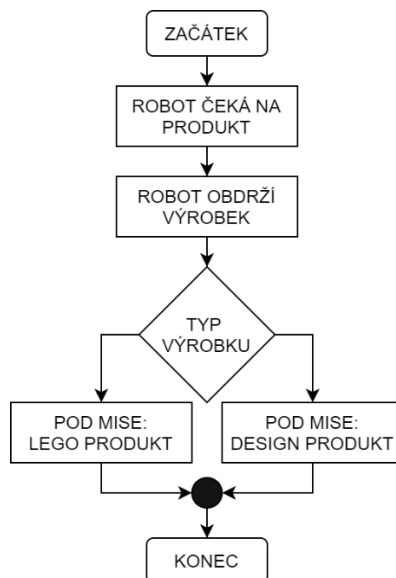
linka počítat s mobilním robotem. V případě, že mobilní robot nevysílá tento signál, linka pracuje v režimu bez robota. Pokud je výrobek připraven k naložení na robota, vyšle linka signál do WISE modulu (digitální vstup 0). Mobilní robot tento signál očekává a po obdržení jede na nakládací pozici v lince. Po příjezdu do linky pošle mobilní robot signál, že je na pozici a je připraven na naložení výrobku. V tento moment přeskočí vykonávání programu do další pod mise, která se stará o čekání na výrobek a následné doručení.



Obrázek 30: Diagram funkčnosti hlavní mise

4.4.2 Mise čekání na produkt

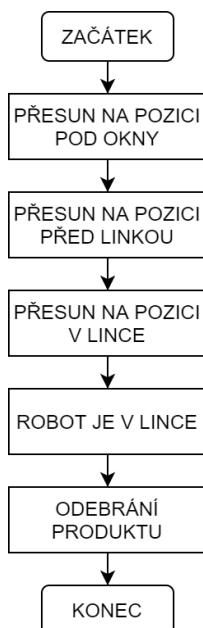
Při zavolání této mise se robot nachází v lince a je připraven na odebrání produktu. Hlavním účelem této mise je určení, zda obdržel výrobek LEGO, nebo design. O to se stará dvojice digitálních vstupů. Prvním signálem je digitální vstup 1 (DI1), který obdrží mobilní robot od linky v okamžiku, kdy je výrobek naložen. O přesunutí výrobku z linky na mobilního robota se stará robotické rameno KUKA. Po přesunutí produktu mobilní robot nedokáže rozpoznat, zda obdržel LEGO, nebo design produkt. Tuto informaci obdrží pomocí druhého digitálního signálu (DI2). Pokud je na digitálním vstupu (v okamžiku naložení produktu) logická 0, dostal mobilní robot naložený design výrobek, pokud je na vstupu logická 1, obdržel mobilní robot LEGO produkt. Podle typu naloženého výrobku se spustí pod mise, která obsluhuje doručení konkrétního výrobku.



Obrázek 31: Diagram funkčnosti mise čekání na produkt

4.4.3 Mise doručení LEGO produktu

Pokud mobilní robot obdrží LEGO výrobek, je následné doručení řízeno pomocí pod mise LEGO. Úkolem mobilního robota je prezentovat výrobek určenou trasou a poté výrobek vrátit zpět do linky, která ho následně rozloží. Robot nejprve projede s výrobkem kolem oken SmartFactory, poté vyjede z prostorů linky a ukáže výrobek případným pozorovatelům, a následně vrátí výrobek do linky. Tato mise kopíruje trasu, která je vyobrazena v první implementaci.

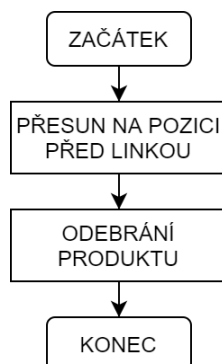


Obrázek 32: Diagram funkčnosti mise doručení LEGO produktu

4.4.4 Mise doručení design produktu

Pokud mobilní robot obdrží design výrobek, spustí se pod mise design. Oproti lego produktu se již design produkt nevrací do linky, ale předává přímo zákazníkovi. Jakmile je na mobilním robotu naložen design produkt, vyjede mobilní robot z prostorů linky a doručí produkt na místo, odkud si ho již převezme zákazník. Po odebrání produktu od zákazníka se mobilní robot vrací na určenou pozici, kde

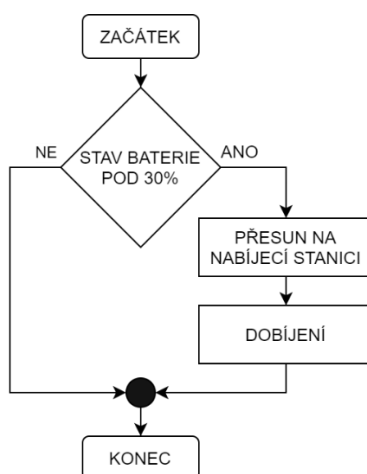
čeká na další zavolání od linky. Trasa mobilního robota opět kopíruje trasu, která je vyobrazena v návrhu implementace.



Obrázek 33: Diagram funkčnosti mise doručení design produktu

4.4.5 Mise nabíjení

Mise nabíjení udržuje mobilního robota provozuschopného a nabitého po celou dobu obsluhy linky. Pokud po dodání výrobku dojde k vybití baterie mobilního robota pod 50 %, dojde ke spuštění procesu dobítí baterie. Po příjezdu na dobíjecí stanici začne dobíjení baterie a mobilní robot se nabíjí do chvíle, než je opět zavolán od linky. Po přijetí požadavku od linky robot opouští nabíjecí stanici a opakuje misi od začátku.



Obrázek 34: Diagram funkčnosti mise dobíjení

4.5 Možnosti přesného najetí do linky

Aby bylo možné na nadstavbu robota umístit výrobek vždy na stejné místo, je nutné, aby mobilní robot najel do linky na nakládací pozici s velkou přesností. Pokud mobilní robot odebírá design produkt, který následně předává zákazníkovi, není tato přesnost příliš nutná. Pokud se ale mobilní robot vrací s LEGO produktem a požaduje odebrání produktu zpět do linky, je nutná přesnost na několik málo milimetrů. Produkt z mobilního robota nakládá i vykládá robotické rameno KUKA, které vždy najíždí do stejné pozice. To znamená, že tam kde LEGO produkt na mobilního robota naloží, na stejném místě produkt očekává i při vykládání. Mobilní robot MiR100 nenajede vždy do přesně stejné pozice a je možné, že při návratu do linky bude vždy o několik milimetrů, či dokonce centimetrů posunut. Při posunu mobilního robota o několik centimetrů by odebrání produktu nebylo takřka možné, jelikož by robotické

rameno očekávalo výrobek na zcela jiné pozici. Z tohoto důvodu jsem se rozhodoval mezi třemi variantami, jak tento problém eliminovat.

4.5.1 Kamera

První a zároveň technologicky nejnáročnější možné řešení je použití kamery. Kamera by byla umístěna na robotickém ramenu a pomocí rozpoznávání tvarů předmětů by rozeznávala pozici výrobku. Robotické rameno by se naklonilo nad mobilního robota a za pomoci kamery určilo přesnou lokaci výrobku na mobilním robotu. Tuto lokaci by kamera předala robotickému ramenu, které by přesně vědělo, kde se výrobek nachází a jak výrobek uchopit.

Řešení za pomoci kamery má jednu velkou výhodu, ale na druhou stranu také nevýhody. Při použití kamery může robot najet do linky pokaždé jinak a jeho přesnost by nebyla nutná. Velkou výhodou by byla možnost pohybování s výrobkem na platformě mobilního robota. Kamera by vždy detekovala pozici výrobku, a to i kdyby byl posunutý, nebo natočený jiným směrem z původní pozice. To by umožňovalo, aby si zákazník výrobek prohlédl a poté umístil zpět na mobilního robota. Nevýhodou řešení je cena a velká technická náročnost. Pro zprovoznění rozpoznávání obrazu by bylo potřeba propojit kameru s řídicím systémem linky a vytvořit program, který by produkty rozpoznával.

4.5.2 Senzory vzdálenosti

Dalším možným řešením je použití laserových senzorů vzdálenosti, s kterými se nabízí dvojice možných řešení.

V prvním případě by byly senzory umístěny na těle mobilního robota a snímaly přesnou vzdálenost k vybraným překážkám. Mobilní robot by po najetí do linky za pomoci senzorů zkontroloval, zda se nachází na přesné pozici a popřípadě svou pozici poupravil. Řešení naráží na problém v komunikaci s mobilním robotem. Komunikace s mobilním robotem MiR100 za použití WISE modulu umožňuje pouze ovládání digitálních vstupů a výstupů. Pro potřebu tohoto řešení by bylo nutné do robota přenášet analogovou hodnotu ze snímačů.

Druhá varianta je umístění senzorů na výrobní linku. Místo pozice mobilního robota by senzory snímaly pozici výrobku na robotu. Při použití dvou laserových senzorů by jeden snímal pozici výrobku v ose X a druhý senzor pozici v ose Y. Údaje o poloze výrobku by senzory předaly do řídicího PLC linky, které by následně navedlo robotické rameno na přesné místo výrobku.

4.5.3 Markery

Posledním uvažovaným řešením je najíždění do linky za pomoci markerů. Markery jsou přímým řešením mobilního robota jak zajistit, aby najížděl do pozic s určitou přesností. Pro navigaci mobilního robota může být použito několik typů markerů. Jedná se o V, L, VL a bar marker. Každý marker má přesně daný tvar a rozměry, které musí být při výrobě striktně dodrženy. Marker by měl být umístěn přímo před mobilním robotem na pozici, kde bude robot najíždět.

4.6 Testování najíždění do linky

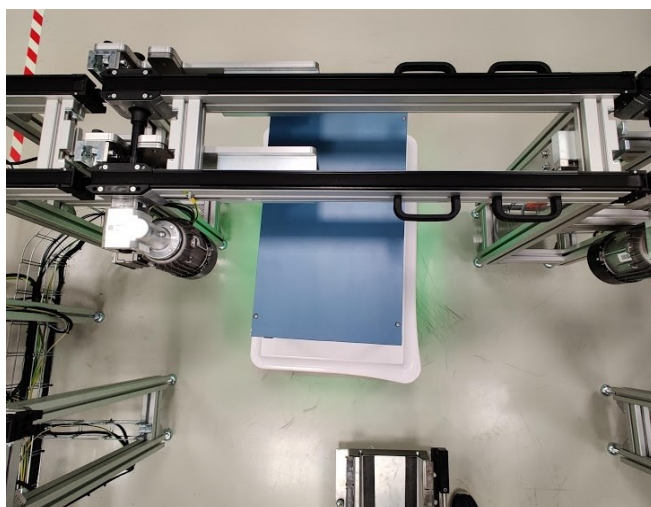
Pro ověření, jak přesně dokáže mobilní robot na pozici najíždět, jsem provedl řadu testů. Testy zahrnují najíždění mobilního robota na pozici v mapě, ale také na různé typy markerů. Výrobce uvádí, že každý typ markeru poskytuje jinou přesnost a ze všech typů markerů je VL marker uváděn jako nejpřesnější.

Při testování jsem kontroloval tři vzdálenosti. Vzdálenost mezi mobilním robotem a profilem linky z levé i pravé strany. Třetí kontrolovanou vzdáleností byla vzdálenost mezi předkem robota a kolejnicí pro posun robotického ramene. Pro každý způsob najíždění jsem provedl 10 pokusů. Při

každém pokusu jsem vždy vyjel s robotem mimo prostor linky a robota poslal zpět na pozici / marker v lince. Z provedených pokusů jsem určil minimální a maximální naměřenou vzdálenost, z kterých jsem následně určil jejich rozdíl. Rozdíl dokazuje, s jakou přesností mobilní robot na dané místo najíždí.

4.6.1 Pozice bez markeru

Jako první jsem provedl test, jak je schopen mobilní robot najet na požadovanou pozici bez markerů. Mobilní robot najížděl na pozici, která byla vytvořena ve virtuální mapě. Jelikož si robot hlídá své okolí a prostor linky byl pro robota příliš úzký, bylo nutné umístit pozici mírně před prostory linky. Po najetí na pozici byl robotu odeslán příkaz, aby pomocí příkazu „Relative move“ popojel o určitou vzdálenost dopředu do prostor linky. Příkaz částečně umožní jet do užších prostorů, aniž by je mobilní robot detekoval jako překážku. Příkaz „Relative move“ nemá na přesnost najíždění na pozici v mapě žádný vliv a pouze posouvá robota v dané ose vždy o stejnou vzdálenost.



Obrázek 35: Test přesnosti mobilního robota – bez markeru

Tabulka 9: Výsledky testování přesnosti – bez markeru

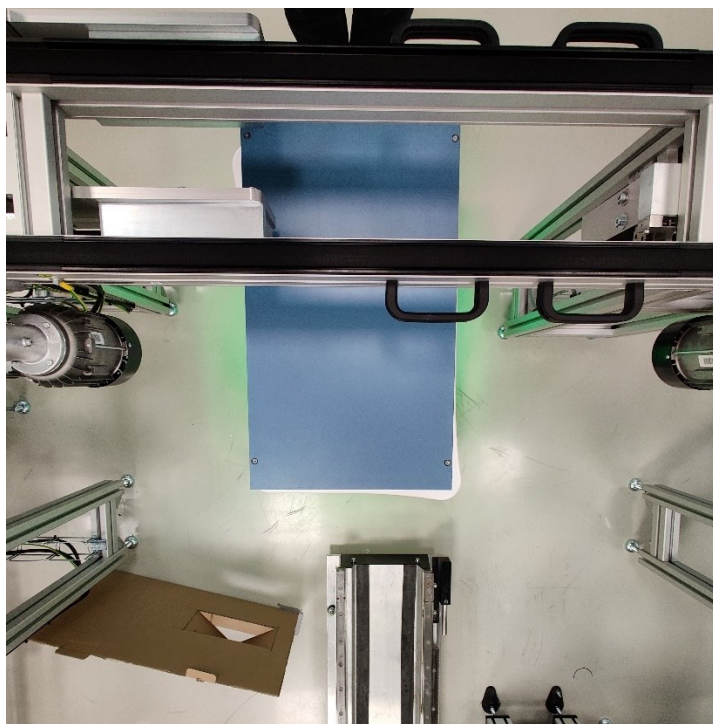
Měření	Vzdálenost vlevo (mm)	Vzdálenost ve předu (mm)	Vzdálenost vpravo (mm)
1	195	289	273
2	185	275	277
3	225	300	238
4	190	290	273
5	215	320	250
6	193	290	270
7	220	280	240
8	205	230	260
9	223	247	237
10	240	285	225
Min.	185	230	225
Max.	240	320	277
Rozdíl	55	90	52

Z testu lze pozorovat, že pokud najíždí robot pouze na pozici ve virtuální mapě, dosahuje značné nepřesnosti. V ose X, z pohledu na virtuální mapu Smartfactory (Obrázek 25), najížděl mobilní robot s přesností na 90 mm. V ose Y najížděl robot s přesností na 55 mm. Takto velké odchylky v najíždění jsou pro provoz mobilního robota naprosto nevyhovující a je potřeba zmenšit nepřesnosti na minimum.

4.6.2 VL marker

Pro zpřesnění najíždění mobilního robota na pozici v lince jsem použil VL marker. Z údajů od výrobce a distributora robotů se jedná o nejpřesnější marker, díky kterému by měl mobilní robot dosahovat největší přesnosti. Z toho důvodu jsem další test provedl z VL markerem. Jelikož markery nebyly dodány společně s mobilními roboty, bylo třeba markery vyrobit. Každý marker má přesně daný tvar, rozměry a musí být vyroben s přesností na ± 1 mm. Pro potřeby testování jsem markery vyrobil za pomoci kartonu, a to při dodržení všech náležitostí na rozměry. Při výrobě VL markeru je nejpodstatnější správně vyrobit „V“ vykrojení, které snímá 3D kamera a dle kterého se robot na marker naviguje.

V ideálním případě by měl být marker umístěn před přední stranou robota. Z důvodu omezeného prostoru v lince jsem byl nucen umístit marker lehce na stranu. Při prvotním vytváření markeru robot najížděl přímo naproti markeru. Markery však umožňují nastavení „offsetu“, jedná se o posunutí, nebo upravení finální pozici robota na markeru. Offset lze nastavit jak pro osu X, osu Y, tak pro otočení. Pozice mobilního robota po nastavení správných offsetů lze vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 36: Test přesnosti mobilního robota – VL marker

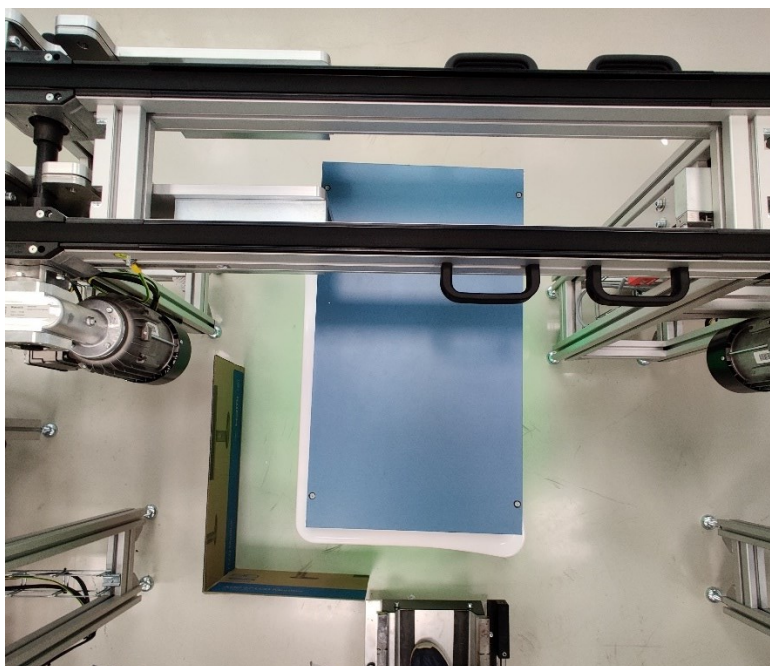
Tabulka 10: Výsledky testování přesnosti – VL marker

Měření	Vzdálenost vlevo (mm)	Vzdálenost vepředu (mm)	Vzdálenost vpravo (mm)
1	280	264	185
2	278	264	185
3	280	263	184
4	280	262	184
5	283	260	180
6	284	261	180
7	283	260	180
8	283	259	180
9	281	261	182
10	283	260	181
Min.	278	259	180
Max.	284	264	185
Rozdíl	6	5	5

Pokud mobilní robot najížděl do linky za pomoci VL markeru, dosahoval již mnohem lepších výsledků nežli bez markeru. V ose X najížděl s přesností na 5 mm a v ose Y s přesností na 6 mm.

4.6.3 L marker

Dalším typem testovaného markeru byl L marker. Stejně jako jiné markery má přesně dané rozměry, které je nutné dodržet s přesností na ± 1 mm. Pro použití L markeru již není udávána žádná míra přesnosti, s kterou dokáže mobilního robota na marker navést.



Obrázek 37: Test přesnosti mobilního robota – L marker

Tabulka 11: Výsledky testování přesnosti – L marker

Měření	Vzdálenost vlevo (mm)	Vzdálenost vepředu (mm)	Vzdálenost vpravo (mm)
1	305	200	160
2	304	200	160
3	305	203	160
4	305	200	159
5	306	201	158
6	305	200	160
7	305	202	159
8	303	201	159
9	305	201	158
10	305	200	158
Min.	303	200	158
Max.	306	203	160
Rozdíl	3	3	2

Z naměřených výsledků lze pozorovat, že L marker ještě více zpřesňuje najíždění robota na přesnou pozici. V ose X byla maximální odchylka 3 mm a v ose Y 3 mm. Výsledek tohoto testu ukazuje, že díky L markeru dokáže mobilní robot opakovaně najíždět do pozice s větší přesností nežli s VL markerem. Test tedy vyvrátil tvrzení distributora, který označoval VL marker za nejpresnější.

V průběhu testování jsem se setkal s chybou mobilního robota, kdy není schopen na L marker dojet. L marker byl umístěn tak, aby nemohl mít mobilní robot problém se na pozici dostat. Problém nastal až při finálním natáčení robota souběžně s markerem. Místo natočení se robot zasekl v natáčecí fázi a pohyboval se neustále tam a zpět v rámci přibližně 5°. Po zkontrolování stavu robota přes webové rozhraní, robot stále prováděl proces dokování a nevykazoval žádnou chybu. Ani po určité době se robot z tohoto cyklu nedostal a bylo nutné ukončit vykonávaný program. Problém jsem vyřešil přemístěním markeru na jiné místo a opětovným přidáním markeru do mapy. Poté se problém již neprojevil.

Další komplikace nastala při přidávání markeru do virtuální mapy. Pokud jsem zvolil, aby mobilní robot detekoval pozici markeru v prostředí, nedokázal určit pozici markeru. Místo skutečného L markeru detekoval mobilní robot jako L marker roh výrobní linky. A to i přes naprosto neodpovídající rozměry, které se značně lišily oproti daným rozměrům pro L marker. Při načítání L markeru jsem tedy na tento roh umístil překážku, aby již nebyl detekován jako marker.

4.6.4 Další typy markerů

Bar marker

Jako další bylo možné použít Bar marker. Bar marker je složen ze dvou částí, které jsou postaveny v dané vzdálenosti od sebe a mezi které mobilní robot najíždí. Marker jsem vyrobil přesně podle rozměrů, které jsou od výrobce uvedeny, ale i přes mnohonásobné pokusy se mi nepodařilo tenhle typ markeru za pomoci mobilního robota detekovat.

V marker

Posledním typem, který je možné pro mobilního robota použít je V marker. Tvarově obsahuje stejné „V“ vykrojení jako VL marker, již ale neobsahuje další plochu na pravé straně od vykrojení, tak jako VL marker. Jedná se tedy o menší a odlehčenější verzi VL markeru, který nebude dosahovat větší přesnosti a z tohoto důvodu jsem tento typ markeru netestoval.

4.7 Použití vybraného způsobu navigace

Z navržených řešení, jak zvětšit přesnost najíždění mobilního robota, jsem použil navigaci za pomoci markerů. Pro tento způsob jsem se rozhodl z důvodu, že se jedná o oficiální řešení implementované přímo v mobilním robotu. Z proběhlého testování markerů, vyšel jako nejpřesnější L marker, který jsem se rozhodl použít jako finální řešení pro navigaci mobilního robota na pozici v lince. Marker jsem nechal vyrobit přesně dle požadovaných rozměrů a požadavků pro L marker. Marker je vyroben z pevnějšího materiálu a je vyroben tak, aby vzhledem zapadl do prostředí linky.



Obrázek 38: Umístění finálního L markeru do prostoru linky

5 Ověření možností kooperace dvou mobilních robotů

SmartFactory, CPIT T3 je vybavena dvojicí mobilních robotů firmy MiR. Jedná se o modely MiR100 a MiR250. Mobilní robot MiR100 je primárně určen pro obsluhu automatické výrobní linky. Mobilní robot MiR250 je momentálně určen pro testování funkcí robota a pro studijní účely. Při provozu každého robota zvlášť mezi nimi neprobíhá žádná vzájemná komunikace. Mobilní roboty na sebe při střetu reagují stejně, jako na každou jinou překážku. Při střetnutí dvou mobilních robotů dojde k jejich zastavení a snahy se navzájem objet. Při testování se stalo, že zvolili stejnou náhradní trasu a střetli se opakovaně. K zabránění těmto střetům, a k dalším funkcím, se používá externí zařízení MiR Fleet, které umožňuje vzájemnou komunikaci mobilních robotů MiR.

MiR Fleet je zařízení, které zajišťuje vzájemnou komunikaci mobilních robotů a umožňuje nové funkce. Provedením se jedná o malý počítač, který je umístěn do sítě mobilních robotů. Stejně jako k mobilním robotům se do prostředí MiR Fleet přistupuje přes webové rozhraní. MiR Fleet slouží především pro řízení většího počtu mobilních robotů.

Hlavní funkcí MiR Fleet je vzájemná komunikace mobilních robotů. Tato komunikace umožňuje funkčnost systému vzájemnému vyhýbání. Pokud je mobilní robot v pohybu, jeho data o poloze a překážkách jsou neustále odesílány do systému MiR Fleet. Pokud by se mobilní robot blížil, nebo projížděl okolo jiného mobilního robota, MiR Fleet by danou situaci vyhodnotil. Pokud by docházelo k velmi těsnému průjezdu okolo, nebo dokonce vzájemnému střetu, upravil by trasu mobilních robotů tak, aby se s dostatečným odstupem minuli.

Další funkcí, která souvisí se vzájemnou komunikací, jsou takzvané „modré zóny“. Jedná se o nový prvek ve virtuální mapě, který lze po spárování mobilních robotů s MiR Fleet použít. Slouží pro omezení počtu robotů v dané oblasti. Po vyznačení modré zóny v mapě, lze zvolit, kolik robotů se může v dané zóně najednou vyskytovat. Pokud je dosaženo maximálního počtu robotů v zóně, další mobilní robot čeká před zónou, nežli jiný mobilní robot zónu opustí. Modré zóny jsou vhodné například pro úzké prostory, kde projede pouze jeden robot.

Po spárování mobilního robota s MiR Fleet jsou zpřístupněny také další funkce, které již nesouvisí se vzájemnou komunikací robotů. Jednou z nich je automatické nabíjení, které umožňuje automatické posílání mobilních robotů na nabíjecí stanici. Funkce nabízí množství možností, kdy se má robot jet nabíjet, jak dlouho se má nabíjet, jak moc se má nabíjet a další. Tuto funkci lze však samostatně vytvořit pomocí mise v mobilním robotu. Výhodná je tedy pouze pro větší počet robotů, které se například dělí o nabíjecí stanici. Mezi další funkce patří možnost komunikace mezi MiR Fleet a výtahem, která umožňuje přejíždět s mobilními roboty mezi patry, nebo další funkce nouzové evakuace všech mobilních robotů na předem určené místo.

Při spárování mobilního robota s MiR Fleet dojde k vzájemné synchronizaci veškerých virtuálních map a misí. Po spárování se předpokládá, že další mise pro mobilní roboty budou rozdělovány přes MiR Fleet a nikoliv přes mobilního robota. Z testování vyplynulo, že mise spuštěné z mobilního robota se mohou zaseknout kvůli konfliktům s MiR Fleet. Spuštění misí v MiR Fleet je umožněno za pomoci tlačítka v dashboardu, nebo za pomoci komunikačního protokolu REST API. REST API umožňuje odesílat do robota příkazy, nebo číst informace z robota za použití vlastního webu či aplikace.

Závěr

V práci jsem se věnoval implementaci průmyslového mobilního robota do Smartfactory. Pracoval jsem s autonomním mobilním robotem MiR100 od firmy Mobile industrial robots.

Při analýze vhodného využití mobilního robota do prostorů Smartfactory, CPIT TL3 jsem se zaměřil na automatickou výrobní linku, která se v prostoru nachází. Výrobní linka vyrábí dvojici produktů, které již nejsou dále distribuovány mimo prostory linky a převzetí vyrobeného výrobku tedy nebylo možné. Z tohoto důvodu jsem využil mobilního robota pro distribuci hotových produktů dále po prostoru Smartfactory. Linka vyrábí design a LEGO produkt. Design produkt je určen pro cílového zákazníka, kterému tento produkt mobilní robot doručí. LEGO produkt není určen pro zákazníky a slouží pouze k ukázce, čeho je linka schopná. Mobilní robot s LEGO produktem projede prostory Smartfactory a poté LEGO produkt vrátí lince, která ho následně rozebere na jednotlivé komponenty.

Po zvolení vhodné implementace mobilního robota do Smartfactory jsem začal s realizací implementace. V prvním kroku bylo nutné vytvořit virtuální mapu Smartfactory, kterou mobilní robot potřebuje pro orientaci v prostoru. Do mapy jsou vloženy jednotlivé překážky, zakázané zóny, pozice a markery, které jsou pro implementaci nutné. Ve Smartfactory je vytvořená vlastní wifi síť, na kterou jsou napojené veškeré zařízení potřebné pro provoz robota a komunikaci s výrobní linkou. Komunikace s linkou je zajištěna za pomoci WISE modulu, který obsahuje 4 digitální vstupy a 4 digitální výstupy. Každý digitální signál má jasně daný význam a postačují pro komunikaci mezi mobilním robotem a výrobní linkou. Program pro obsluhu výrobní linky je členěn na jednotlivé mise. Pro zahájení obsluhy výrobní linky je nutné v mobilním robotu spustit hlavní misi, která si již volá další pod mise. Vyrobené produkty jsou na mobilního robota předávány za pomoci robotického ramene. Při nakládání produktů na robota není důležitá přesnost najetí mobilního robota na pozici. Při vykládání LEGO produktu, který robotické rameno vrací zpět do linky, je již nutná vysoká přesnost, aby bylo schopné robotické rameno produkt správně uchytit. Této přesnosti mobilní robot nedosahoval, a proto jsem přišel s trojicí návrhů, jak přesnost zvýšit. Použití kamery pro určení přesné pozice produktu, použití externích senzorů pro přesné najetí mobilního robota na pozici a využití markerů, které zvyšují přesnost najetí na pozici. Po konzultacích a uvážení komplexnosti řešení jsem se rozhodl pro použití markerů. Jelikož mobilní robot podporuje více druhů markerů, provedl jsem testování jejich přesností. Z testů vyšel nejlépe L marker, který dosahoval maximální odchylky 3 mm při deseti testech a byl pro úlohu využit.

Výsledkem práce je plně automatizovaný proces obsluhy výrobní linky. Mobilní robot MiR100 je schopen reagovat na zavolání od linky, následně přijet pro produkt, převzít produkt a provést jeho prezentaci, nebo doručení na požadované místo. Součástí obsluhy je také hlídání stavu baterie a případné automatické dobítí. V závěru práce jsem otestoval vzájemnou kooperaci dvou mobilních robotů, která fungovala dle předpokladů.

V rámci dalšího vývoje práce bych viděl potenciál ve vylepšení způsobu komunikace. Použitá komunikace přes WISE modul je omezená na datové typy a malý počet vstupů a výstupů. Při dalším vývoji bych použil komunikaci přes REST API, které mobilní robot podporuje. Dále bych vybavil robotické rameno kamerou. V případě vybavení robotického ramena kamerou by došlo k rozšíření možností mobilního robota. Bez kamery musí LEGO produkt zůstat na stejné pozici, na kterou byl položen robotickým ramenem. Při použití kamery by bylo možné odebrat LEGO produkt z mobilního robota a následně ho položit zpět. Divák by si tedy mohl LEGO produkt sám prohlédnout. Kamera by poté identifikovala pozici LEGO produktu a předala informaci robotickému ramenu.

Literatura

- [1] Robot. Merriam-Webster [online]. [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/robot>
- [2] Types and Applications of Autonomous Mobile Robots (AMRs). CONVEYCO [online]. [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.conveyco.com/types-and-applications-of-amrs/>
- [3] Chen, Xiaoqi and Chen, Y.Q. and Chase, James. Mobiles Robots - Past Present and Future [online]. 2009 [cit. 2020-11-13]. ISBN 978-953-307-001-8.
- [4] Shakey the Robot. Computer History [online]. [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://history-computer.com/Dreamers/Shakey.html>
- [5] A Timeline History of Robotics. Futura automation [online]. [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://futura-automation.com/2019/05/15/a-history-timeline-of-industrial-robotics/>
- [6] AGV vs. AMR - What's the Difference? MIR [online]. [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.mobile-industrial-robots.com/en/insights/get-started-with-amrs/agv-vs-amr-whats-the-difference/>
- [7] AGV vs AMR. What should you buy? Differences? Pros & Cons? - Who is the winner? AGVnetwork [online]. [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.agvnetwork.com/agv-vs-amr>
- [8] H. Chen, H. Cheng, B. Zhang, J. Wang, T. Fuhlbrigge, J. Liu. Semiautonomous industrial mobile manipulation for industrial applications [online]. [cit. 2020-11-16]. ISBN 978-1-4799-0612-3. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6705472>
- [9] H. Unger, T. Markert, E. Müller. Evaluation of use cases of autonomous mobile robots in factory environments [online]. 2018 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918311600>
- [10] Optimize your workflows with the mobile robots from MiR. Mobile industrial robots [online]. [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://www.mobile-industrial-robots.com/en/solutions/robots/>
- [11] MiR EU Pallet Lift 1000 TM. Mobile industrial robots [online]. [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://www.mobile-industrial-robots.com/en/solutions/robots/mir-top-modules/mir-eu-pallet-lift-1000-tm/>
- [12] MiR Shelf Carrier 250 TM. Mobile industrial robots [online]. [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://www.mobile-industrial-robots.com/en/solutions/robots/mir-top-modules/mir-shelf-carrier-250-tm/>
- [13] MiR Hook 100 TM. Mobile industrial robots [online]. [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://www.mobile-industrial-robots.com/en/solutions/robots/mir-top-modules/mir-hook-100-tm/>
- [14] Odvětví. KUKA [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/odv%C4%Btv%C3%AD>
- [15] Průmysl 4.0 u společnosti KUKA. KUKA [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/vyroba-v-budoucnosti/pr%C5%AFmysl-4,-d,-0/pr%C5%AFmysl-4,-d,-0-u-spole%C4%8Dnosti-kuka>
- [16] KMR iiwa. KUKA [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty-slu%C5%BEby/mobilita/mobiln%C3%AD-roboty/kmr%C2%A0iiwa>

- [17] KMR QUANTEC. KUKA [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/mobilita/mobiln%C3%AD-roboty/kmr%C2%A0quantec>
- [18] EINSTEIN, Ben. *Meet the drone that already delivers your packages, Kiva robot teardown* [online]. [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: <https://robohub.org/meet-the-drone-that-already-delivers-your-packages-kiva-robot-teardown/>
- [19] ROSER, Christoph. *The Amazon Robotics Family: Kiva, Pegasus, Xanthus, and more...* [online]. 2020 [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: <https://www.allaboutlean.com/amazon-robotics-family/>
- [20] Mir100 user guide 3.1 [online]. 10/2020 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: https://www.mobile-industrial-robots.com/media/11446/mir100-user-guide_31_en.pdf
- [21] MiR250. Mobile industrial robots [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.mobile-industrial-robots.com/en/solutions/robots/mir250/>

Seznam příloh

Součástí práce jsou přílohy v elektronické podobě.

- Dokumenty
 - MiR100_DataSheet.pdf
 - MiR100_specifikace.pdf
 - MiR250_specifikace.pdf
- Video
 - Trasa_produkту_design.mp4
 - Trasa_produkту_lego.mp4
- Export virtuální mapy a programu mobilního robota
 - CPIT_TL3_MiR100_v2-10-3-1.site